



TUGAS AKHIR - TE 141599

**PEMASANGAN SVC UNTUK PERBAIKAN STABILITAS
TEGANGAN SISTEM TRANSMISI JAMALI 500 KV SETELAH
PENAMBAHAN PEMBANGKIT 1575 MW PADA TAHUN 2017**

Radhito Dewanata Putra
NRP 2215105068

Dosen Pembimbing
Prof. Ir Ontoseno Penangsang M.Sc., Ph.D
Vita Lystianingrum Budiharto Putri, ST., M.Sc., Ph.D

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017



TUGAS AKHIR - TE 141599

**PEMASANGAN SVC UNTUK PERBAIKAN STABILITAS
TEGANGAN SISTEM TRANSMISI JAMALI 500 KV
SETELAH PENAMBAHAN PEMBANGKIT 1575 MW PADA
TAHUN 2017**

Radhito Dewanata Putra
NRP 2215105068

Dosen Pembimbing
Prof. Ir Ontoseno Penangsang M.Sc., Ph.D
Vita Lystianingrum Budiharto Putri, ST., M.Sc., Ph.D.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017



FINAL PROJECT - TE 141599

**INSTALLATION OF SVC TO VOLTAGE STABILITY
IMPROVEMENT JAMALI 500 KV TRANSMISSION SYSTEM
AFTER THE ADDITION OF 1575 MW POWER PLANT ON
2017**

Radhito Dewanata Putra
NRP 2215105068

Counsellor Lecturer
Prof. Ir Ontoseno Penangsang M.Sc., Ph.D
Vita Lystianingrum Budiharto Putri, ST., M.Sc., Ph.D

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING
Faculty of Electrical Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2017

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan Tugas Akhir saya dengan judul **“Pemasangan SVC untuk Perbaikan Stabilitas Tegangan Sistem Transmisi Jamali 500 kV Setelah Penambahan Pembangkit 1575 MW pada tahun 2017”** adalah benar benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka.

Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, Juli 2017

Radhito Dewanata Putra
NRP:2215 105 068

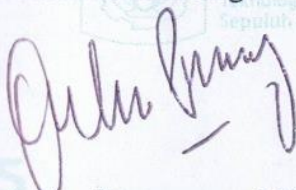
**PEMASANGAN SVC UNTUK PERBAIKAN STABILITAS
TEGANGAN SISTEM TRANSMISI JAMALI 500 KV
SETELAH PENAMBAHAN PEMBANGKIT 1575 MW PADA
TAHUN 2017**

TUGAS AKHIR

**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada
Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga
Departemen Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

Menyetujui :

Dosen Pembimbing I



Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D.
NIP. 194907151974121001

Dosen Pembimbing II



Vita L.B. Putri, ST., M.Sc., Ph.D.
NIP. 198208292006042001

26.2.2019



PEMASANGAN SVC UNTUK PERBAIKAN STABILITAS TEGANGAN SISTEM TRANSMISI JAMALI 500 KV SETELAH PENAMBAHAN PEMBANGKIT 1575 MW PADA TAHUN 2017

Nama : Radhito Dewanata Putra
Pembimbing I : Prof. Ir Ontoseno Penangsang M.Sc., Ph.D
Pembimbing II : Vita Lystianingrum Budiharto Putri, ST., M.Sc.,
Ph.D.

ABSTRAK

Karakteristik beban akan sangat mempengaruhi kapasitas (*capacity*) dan kemampuan (*capability*) sistem dalam menyalurkan daya. Hal itu menyebabkan sistem transmisi dipaksa untuk beroperasi pada batas stabilitasnya, yang membuat sistem transmisi bekerja pada tekanan yang besar. Faktor utama yang mempengaruhi stabilitas tegangan pada sistem transmisi adalah limit daya reaktif generator, karakteristik dari beban yang terhubung, karakteristik dari peralatan yang mengkompensasi daya reaktif menyebabkan tegangan bus rendah, sehingga diperlukan suatu cara untuk meningkatkan tegangan dan menghilangkan ketidakstabilan tegangan dalam sistem tenaga. Dengan menggunakan perangkat FACTS performa sistem tenaga dan stabilitas sistem tenaga dapat ditingkatkan, salah satunya dengan *Static VAR Compensator* (SVC). Pada tugas akhir ini bertujuan untuk memperbaiki stabilitas tegangan terutama memperbaiki profil tegangan setelah adanya penambahan pembangkit 1575 MW pada sistem kelistrikan Jawa-Madura-Bali (Jamali) 500kV tahun 2017 dengan pemasangan SVC pada bus yang sensitif. Analisis stabilitas tegangan dapat dilakukan dengan metode kestabilan kurva PV dan digunakan metode sensitivitas tegangan untuk menentukan lokasi pemasangan SVC. Besar kapasitas SVC yang ditambahkan sebesar 287.4 MVAR pada bus 9 dan 296.6 MVAR pada bus 14. Dampak dari pemasangan SVC dapat dilihat pada profil tegangan bus terendah yaitu pada bus 9, yang sebelum pemasangan SVC 0.93636 pu, setelah perbaikan tegangan menjadi 0.95609 pu.

Kata Kunci : Daya Reaktif, Kestabilan tegangan, *Static VAR Compensator* (SVC), Kurva PV, Sensitivitas Tegangan.

Halaman ini sengaja dikosongkan

***Installation of SVC to Voltage Stability Improvement Jamali
500 KV Transmission system after the addition of 1575 MW
power plant in 2017***

Name : Radhito Dewanata Putra
Advisor I : Prof. Ir Ontoseno Penangsang M.Sc., Ph.D
Advisor II : Vita Lystianingrum Budiharto Putri, ST., M.Sc.,
Ph.D.

ABSTRACT

Load characteristic will greatly affect capacity and capability in channeling power. This causes the transmission system to be forced to operate at its stability limit, which makes the transmission system work at great pressure. The main factor affecting the voltage stability of the transmission system is the reactive power limit of the generator, the characteristics of the connected load, the characteristics of the equipment that compensate the reactive power cause the low bus voltage, so it takes a way to increase the voltage and eliminate the voltage instability in the power system. By using FACTS device the performance of power system and power system stability can be improved, one of them with Static VAR Compensator (SVC). This final project aims to improve the voltage stability, especially to improve the voltage profile to the addition of a P and Q load on the Java-Madura-Bali (Jamali) 500kV in 2017 with the installation of SVC on the sensitive bus. Analysis of voltage stability can be done by stability method of PV curve and used voltage sensitivity method to determine the location of SVC installation. Large SVC capacity added at 287.4 MVAR on bus 9 and 296.6 MVAR on bus 14. The impact of the SVC installation can be seen in its low bus voltage profile on the bus 9, which prior to the installation of SVC 0.93636 pu, after repairs voltage to 0.95609 pu.

Keywords : Reactive Power, Voltage Stability, Static VAR Compensator (SVC), PV Curve, Voltage Sensitivity.

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah Robbil 'Alamin, puji syukur kehadiran Allah SWT atas segala limpahan rahmat dan karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir dengan judul:

PEMASANGAN SVC UNTUK PERBAIKAN STABILITAS TEGANGAN SISTEM TRANSMISI JAMALI 500 KV SETELAH PENAMBAHAN PEMBANGKIT 1575 MW PADA TAHUN 2017

Penyusunan tugas akhir ini disusun sebagai salah satu persyaratan dalam menyelesaikan studi pada bidang studi Teknik Sistem Tenaga, Jurusan Teknik Elektro pada Fakultas Teknologi Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Dalam kesempatan ini penulis ingin mengucapkan banyak terima kasih kepada :

1. Segenap keluarga, terutama Ayah dan Ibu tercinta serta kakak penulis yang selalu memberikan dukungan, semangat, dan doa kepada penulis.
2. Bapak Prof. Ir. Ontoseno Penangsang M.Sc., Ph.D dan Ibu Vita Lystianingrum Budiharto Putri, ST., M.Sc., Ph.D sebagai Dosen Pembimbing penulis yang telah memberikan pengetahuan, arahan, dan bantuan dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
3. Bapak Dr. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng. selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro ITS, serta Bapak Dedet Candra Riawan, ST. M.Eng. Ph.D. selaku Koordinator Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga S1.
4. Seluruh dosen pengajar Jurusan Teknik Elektro ITS yang telah banyak memberikan ilmu selama penulis menempuh kuliah.
5. Virginia Zapta Dewi yang selalu memberi dukungan dan doa kepada penulis.
6. Teman-teman kos 66 (Dias, Kuku, Robit, dan Tegar) yang telah membantu memberikan dukungan dan memfasilitasi selama proses pengerjaan skripsi.
7. Teman seperjuangan selama 5 tahun, mulai masih kuliah D3 sampai sekarang (Ilham dan Riky).
8. Khusus teman lintas jalur angkatan 2015 (mas Yoyok) yang memberikan masukan kepada penulis serta umumnya teman-teman seperjuangan lintas jalur angkatan 2015 Jurusan Teknik Elektro ITS dan tidak lupa juga untuk seluruh asisten Laboratorium Simulasi Sistem Tenaga Listrik serta semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu.

Besar harapan penulis agar tugas akhir ini dapat memberikan manfaat dan masukan bagi semua pihak.

Surabaya, Juli 2017

Penulis

DAFTAR ISI

Halaman

JUDUL

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

LEMBAR PENGESAHAN

ABSTRAK	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL	xi

BAB 1 PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah	1
1.2 Permasalahan	2
1.3 Batasan Masalah	2
1.4 Tujuan dan Manfaat	3
1.5 Metodologi	3
1.6 Sistematika Penulisan	4

BAB 2 LANDASAN TEORI

2.1 Sistem Tenaga Listrik	7
2.1.1 Pembangkit Listrik (<i>Power Plant</i>)	8
2.1.2 Saluran Transmisi (<i>Transmission Line</i>)	9
2.1.2.1 Saluran Transmisi Pendek (<i>Short Line</i>)	10
2.1.2.2 Saluran Transmisi Menengah (<i>Medium Line</i>)	12
2.1.2.3 Saluran Transmisi Panjang (<i>Long Line</i>)	14
2.2 Stabilitas Tenaga Listrik	15
2.2.1 Kestabilan Sudut Rotor	16
2.2.2 Kestabilan Frekuensi	17
2.2.3 Kestabilan Tegangan	18
2.2.3.1 Analisa Kurva P-V	19
2.2.3.2 Sensitivitas Tegangan	20
2.3 Daya pada Sistem Tenaga Listrik.....	20
2.3.1 Daya Aktif dan Reaktif	21
2.3.2 Aliran Daya Aktif	22
2.3.3 Aliran Daya Reaktif	22

2.3.4	Daya Semu	23
2.4	Faktor Daya	27
2.4.1.	Koreksi Faktor Daya	28
2.5	<i>Static VAR Compensator (SVC)</i>	29
2.5.1	Metode <i>Automatic Control Switching SVC</i>	31
2.5.2	Pengaruh Pemasangan SVC	32
2.6	Studi Aliran Daya	34
2.6.1	Persamaan Aliran Daya	35
2.6.2	Aliran Daya dan Rugi-rugi Daya pada Saluran	36
2.7	Aliran Daya Metode Newton Rhapson	37
 BAB 3 PEMODELAN SISTEM		
3.1	Data Kelistrikan Jamali 500 kV	43
3.2	Power World 18	47
3.3	Metodologi Simulasi	48
 BAB 4 SIMULASI DAN ANALISIS		
4.1	Data Simulasi	51
4.2	Sistem Pembangkit Listrik Jawa-Madura-Bali (Jamali) 500kV ..	51
4.3	Klasifikasi Bus pada Sistem Tenaga Listrik Jamali 500kV	51
4.4	Simulasi dan Analisis pada Sistem Jaringan	52
4.5	Kurva PV	59
4.6	Sensitivitas Index	61
4.7	Pemasangan SVC	62
4.8	Analisis Stabilitas Tegangan Setelah Penambahan SVC	62
 BAB 5 PENUTUP		
5.1	Kesimpulan	69
5.2	Saran	69
 DAFTAR PUSTAKA		71
RIWAYAT HIDUP		73
LAMPIRAN		

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 1.1	Blok diagram metodologi..... 3
Gambar 2.1	Blok diagram dari pembangkit PLTU 8
Gambar 2.2	Diagram blok umum sistem tenaga listrik 9
Gambar 2.3	Rangkaian pengganti saluran transmisi..... 10
Gambar 2.4	Rangkaian ekivalen saluran transmisi jarak pendek 11
Gambar 2.5	Rangkaian nominal PI saluran transmisi jarak Menengah 12
Gambar 2.6	Rangkaian nominal T saluran transmisi jarak Menengah 13
Gambar 2.7	Rangkaian nominal T saluran transmisi jarak panjang . 14
Gambar 2.8	Klasifikasi kestabilan sistem tenaga 16
Gambar 2.9	Kurva P-V 40
Gambar 2.10	Arah aliran arus listrik 20
Gambar 2.11	Diagram fasor aliran daya aktif dan I sephasa 21
Gambar 2.12	Diagram fasor aliran daya aktif dan I berbeda phasa ... 21
Gambar 2.13	Diagram fasor aliran daya reaktif I <i>lead</i> 90° terhadap V 22
Gambar 2.14	Diagram fasor aliran daya reaktif I <i>lagg</i> 90° terhadap V 22
Gambar 2.15	Penjumlahan trigonometri daya aktif, reaktif dan semu 23
Gambar 2.16	Hubungan Wye (Y) 24
Gambar 2.17	Hubungan Delta (Δ) 25
Gambar 2.18	Hubungan daya aktif, reaktif dan kapasitansi 27
Gambar 2.19	Perbaikan faktor daya 28
Gambar 2.20	Konfigurasi SVC 29
Gambar 2.21	Kurva daya reaktif dan tegangan pada SVC 30
Gambar 2.22	Representasi SVC 31
Gambar 2.23	Diagram satu garis jaringan distribusi 4 bus dengan SVC 32
Gambar 2.24	Tipikal bus dari sistem tenaga 34
Gambar 2.25	Model saluran transmisi untuk perhitungan aliran daya dan rugi saluran 36
Gambar 2.26	Ilustrasi metode Newton Raphson 37
Gambar 3.1	Sistem interkoneksi 500 kV Jamali 43
Gambar 3.2	Sistem interkoneksi 500 kV Jamali setelah penambahan pembangkit 1575 MW 44
Gambar 3.3	Diagram alir metodologi pelaksanaan studi 49

Gambar 4.1	Grafik profil tegangan bus sistem (a) bus no. 1-18, (b) bus no. 19-36	58
Gambar 4.2	Grafik rugi-rugi daya sistem (a) saluran no. 1-23, (b) saluran no. 24-45	59
Gambar 4.3	Kurva PV bus sensitif	60
Gambar 4.4	Kurva PV bus sampai mencapai titik kritis	61
Gambar 4.5	Grafik profil tegangan bus sistem sebelum dan setelah perbaikan (a) bus no. 1-18, (b) bus no. 19-36.....	65
Gambar 4.6	Kurva PV bus 7,8,9,14,17,dan 50 setelah perbaikan ...	66
Gambar 4.7	Kurva PV bus 9,13,dan 14 setelah perbaikan	66
Gambar 4.8	Grafik rugi-rugi saluran sebelum dan setelah perbaikan (a) saluran no. 1-23, (b) saluran no. 24-45	68

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 3.1 Data saluran sistem interkoneksi 500 kV Jamali.	44
Tabel 3.2 Data pembangkitan sistem interkoneksi 500 kV Jamali. ..	46
Tabel 4.1 Hasil simulasi load flow tegangan sebelum penambahan pembangkit 1575 MW	52
Tabel 4.2 Hasil simulasi load flow tegangan setelah penambahan pembangkit 1575 MW	54
Tabel 4.3 Rugi-rugi daya saluran transmisi 500 kV sebelum pemasangan SVC	56
Tabel 4.4 Tabel bus-bus paling sensitif sistem Jamali tahun 2017...	62
Tabel 4.5 Hasil profil tegangan pada sistem Jamali tahun 2017	64

Halaman ini sengaja dikosongkan.

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Dalam beberapa tahun terakhir, permintaan tenaga listrik terus meningkat, sedangkan di sisi lain perluasan pembangkit tenaga listrik dan pembangunan saluran transmisi baru untuk meningkatkan *loadability* jaringan listrik sudah sangat terbatas. Karakteristik beban akan sangat mempengaruhi kapasitas (*capacity*) dan kemampuan (*capability*) sistem dalam menyalurkan daya. Hal itu menyebabkan sistem transmisi dipaksa untuk beroperasi pada batas stabilitasnya, yang membuat sistem transmisi bekerja pada tekanan yang besar [1]. Dalam hal ini, analisa kontingensi diperlukan untuk menentukan rating saluran maupun bus sistem saat terjadi gangguan. Kontingensi dapat diartikan sebagai putusnya saluran transmisi dalam menyalurkan daya ke beban atau lepasnya unit pembangkit sebagai pemasok daya. Dampak kontingensi dapat menyebabkan beberapa kejadian yang tidak diinginkan, salah satunya ketidakstabilan tegangan.

Faktor utama yang mempengaruhi stabilitas tegangan pada sistem transmisi adalah limit daya reaktif generator, karakteristik dari beban yang terhubung, karakteristik dari peralatan yang mengkompensasi daya reaktif [2]. Ketika tegangan pada sistem tenaga bus rendah, kerugian juga akan meningkat yang menyebabkan sistem harus melakukan penjadwalan ulang (*rescheduling*) dan pelepasan beban (*load shedding*) pembangkitan guna mengamankan sistem dari *voltage collapse*. Untuk sistem yang kompleks dengan jumlah bus yang sangat banyak, cara diatas kurang efektif, Sehingga diperlukan pengembangan teknik khusus untuk meningkatkan tegangan dan menghilangkan ketidakstabilan tegangan dalam sistem tenaga. *Flexible Alternating Current Transmission Systems* (FACTS) sangat intensif untuk menjaga stabilitas tegangan pada jalur transmisi untuk memanipulasi aliran daya. FACTS bekerja secara fleksibel dan secara langsung dapat digunakan untuk transfer daya reaktif yang sangat membantu dalam pengoperasian jaringan listrik. Performa sistem tenaga dan stabilitas sistem tenaga dapat ditingkatkan dengan menggunakan perangkat FACTS [3], salah satunya dengan *Static VAR Compensator* (SVC) [3]. *Static Var Kompensator* (SVC) adalah salah satu perangkat yang paling efektif untuk meningkatkan stabilitas tegangan dan meningkatkan kemampuan transfer daya jaring transmisi, maka perangkat ini harus terpasang dengan benar pada sistem yang dikerjakan dengan parameter yang sesuai. Untuk Beberapa faktor

dipertimbangkan untuk pengoptimalan instalasi dan parameter SVC, yang memiliki tujuan untuk meningkatkan margin stabilitas tegangan pada sistem sehingga diperoleh peningkatan kapasitas pada transmisi [4].

Dengan penambahan pembangkit 1575 MW sistem transmisi 500 KV pada jamali tahun 2017 yang termasuk sistem kompleks karena memiliki jumlah bus yang cukup banyak yaitu 36 bus, ada beberapa bus yang memiliki tegangan rendah dibawah keadaan normal [6]. Maka diperlukan SVC untuk meningkatkan tegangan pada bus yang mengalami gangguan. Untuk pemasangan SVC tidak bisa disembarang tempat, ada beberapa metode untuk menentukan lokasi pemasangan SVC salah satunya dengan indeks sensitivitas. Cara kerja dari SVC adalah dengan menginjeksikan MVAR yang dibutuhkan pada bus yang mengalami tegangan rendah, sehingga tegangan pada bus kembali pada keadaan normal [8].

1.2 Permasalahan

Permasalahan yang dibahas dalam tugas akhir ini adalah:

1. Bagaimana cara penentuan dan peletakan *Static Var Kompensator* (SVC) untuk perbaikan stabilitas tegangan dari sistem kelistrikan Jawa-Madura-Bali (Jamali) pada tahun 2017?
2. Bagaimana cara menerapkan *sensitivity index* pada sistem?
3. Bagaimana cara menganalisa kestabilan tegangan berdasarkan kurva P-V untuk sistem Transmisi kelistrikan Jawa-Madura-Bali (Jamali) 500 kv setelah adanya penambahan pembangkit 1575 MW?

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah pada tugas akhir ini adalah:

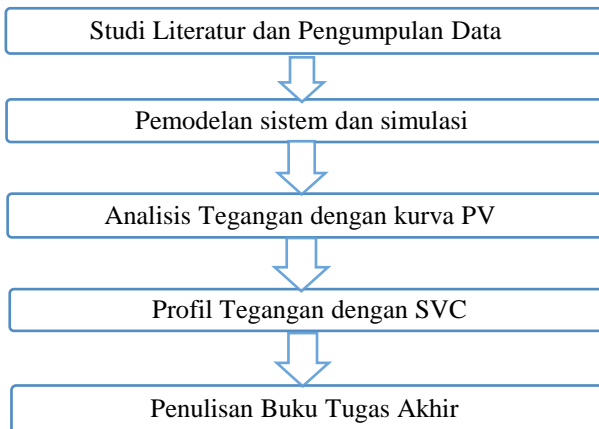
1. Software pendukung untuk simulasikan sistem real diatas adalah Software PowerWorld Simulation 18.
2. Permasalahan yang dibahas tentang stabilitas steady state sistem transmisi Jawa-Madura-Bali (Jamali) 500 kv setelah adanya penambahan pembangkit 1575 MW.
3. Data yang digunakan adalah Data real dari PLN P2B sistem kelistrikan Jawa-Madura-Bali (Jamali) pada tahun 2017.
4. Penggunaan Kurva PV untuk sistem transmisi kelistrikan Jawa-Madura-Bali Jamali 500kV tahun 2017.
5. Penentuan peletakan SVC berdasarkan kurva PV pada bus yang memiliki sensitivitas paling besar terhadap penambahan beban.

1.4 Tujuan dan Manfaat

Tugas akhir ini memiliki tujuan untuk memperbaiki tegangan yang mengalami *under voltage* agar menjadi stabil pada sistem kelistrikan Jawa-Madura-Bali (Jamali) dengan pemasangan SVC berdasar karakteristik kurva PV.

Hasil yang diharapkan dalam penyusunan tugas akhir ini adalah diharapkan dapat memberi manfaat bagi perusahaan listrik terutama yang bergerak dalam bidang pembangkitan sebagai analisis stabilitas tegangan pada sistem Jawa-Madura-Bali (Jamali) tahun 2017 setelah penambahan pembangkit 1575 MW.

1.5 Metodologi



Gambar 1.1 Blok diagram metodologi

Dari gambar diatas maka dapat dijelaskan, Metode yang digunakan dalam penyusunan tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Pengumpulan data dan studi literatur

Studi literatur dilakukan untuk menunjang penguasaan tentang pengumpulan pustaka untuk dipelajari dalam pengerjaan dan penelitian tugas akhir, serta pengumpulan data dan pemodelan sistem. Data-data yang dikumpulkan adalah data sistem kelistrikan Jamali. Data-data meliputi data pembangkitan, data beban, dan data saluran dari masing-masing bus.

2. Pemodelan sistem dan simulasi
Pemodelan yang dikerjakan akan menggunakan *software* simulasi PowerWorld Simulator 18. Dalam tugas akhir ini dilakukan pemodelan *single line diagram* pada *software* simulator. Selanjutnya dilakukan simulasi aliran daya dan kontingensi yang bertujuan untuk mengetahui karakteristik profil tegangan pada sistem Transmisi kelistrikan Jamali tahun 2017.
3. Analisis Tegangan dengan Kurva PV
Analisis load flow dan kontingensi dilakukan menggunakan *software* PowerWorld Simulator 18. Data-data yang telah didapatkan dimasukkan ke dalam program PowerWorld *load flow*. Dari hasil *running* program tersebut didapatkan bus yang mengalami drop tegangan yang cukup tinggi, jika dilakukan penambahan beban P dan Q. Analisis ini dilakukan dengan menunjukkan perhitungan nilai SVC yang akan diinputkan pada bus yang memiliki nilai sensitifitas tinggi untuk perbaikan profil tegangan berdasar analisis kurva PV.
4. Profil Tegangan dengan SVC
Dilihat hasil Profil tegangan pada bus yang mengalami drop tegangan yang telah diperbaiki dengan pemasangan SVC, sehingga pada bus tersebut drop tegangan yang terjadi tidak terlalu besar. Jika belum, penentuan ulang kapasitas SVC.
5. Penulisan Buku Tugas Akhir
Pada tahap terakhir yaitu penulisan buku tugas akhir yang merupakan kesimpulan akhir dari permasalahan yang sudah dianalisis. Kesimpulan berisi permasalahan yang dianalisis. Selain itu diberikan saran atau rekomendasi berkaitan dengan apa yang harus dilakukan.

1.6 Sistematika penulisan

Untuk memudahkan pembahasan yang akan dilakukan, tugas akhir ini terbagi menjadi lima bab dengan sistematika penulisan sebagai berikut :
BAB I : PENDAHULUAN

Bab ini terdiri dari latar belakang, perumusan masalah, tujuan, metodologi pengerjaan tugas akhir, sistematika pembahasan dan relevansi dari penulis.

BAB II : LANDASAN TEORI DAN TINJAUAN PUSTAKA

Pada bab ini menjelaskan teori-teori penunjang yang digunakan dalam pengerjaan tugas akhir ini.

BAB III : PEMODELAN SISTEM

Dalam bab ini dijelaskan metode pelaksanaan studi serta penerapannya dalam studi kasus pada sistem, bagaimana konfigurasinya, dan beberapa hal mengenai operasi sistem Transmisi kelistrikan Jamali pada tahun 2017.

BAB IV : HASIL SIMULASI DAN ANALISIS

Berisi tentang hasil dari simulasi power flow beserta analisis mengenai pengaruh penambahan SVC pada bus yang paling sensitif dan bagaimana pengaruhnya terhadap kestabilan sistem Jawa Bali 500kV.

BAB V : PENUTUP

Bab ini berisi kesimpulan dan saran dari hasil simulasi, studi literatur dan analisis yang telah dilakukan.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 2

LANDASAN TEORI

2.1 Sistem Tenaga Listrik

Daya listrik memberikan peran yang sangat penting dalam kehidupan masyarakat serta dalam pengembangan berbagai sektor ekonomi. Dalam ekonomi modern sangat tergantung pada energy listrik sebagai input kebutuhan dasar. Hal ini menyebabkan peningkatan jumlah pembangkit listrik dan kapasitas, akibatnya kebutuhan saluran transmisi yang menghubungkan pusat pembangkit ke pusat-pusat beban akan juga meningkat termasuk beban-beban yang bersifat dinamis seperti Flexible AC Transmission System (FACTS) [2], oleh karena itu, keandalan sistem tenaga listrik menjadi faktor penting untuk dalam operasi sebuah sistem namun dengan biaya operasi yang minimum.

Karena pada dasarnya keandalan dibutuhkan untuk mengatasi ketidakstabilan tegangan setelah terjadinya gangguan pada sistem daya. Ketidakstabilan steady state pada suatu sistem berhubungan dengan ketidakstabilan sudut daya dan sinkronisasi antar generator yang secara perlahan menghilang, jatuh tegangan pada bus beban di bawah saat kondisi berbeban tinggi dan batas daya reaktifnya [3]. Sistem tenaga listrik secara luas merupakan sistem yang saling berhubungan, sehingga memerlukan sistem interkoneksi karena selain pengiriman daya listrik melalui saluran transmisi ada pembangkit listrik dengan komposisi energi per jenis pembangkit listrik (PLTGU, PLTU, PLTG, PLTD, PLTA, dan PLTP) dan pusat-pusat beban untuk meminimalkan total kapasitas daya dan biaya.

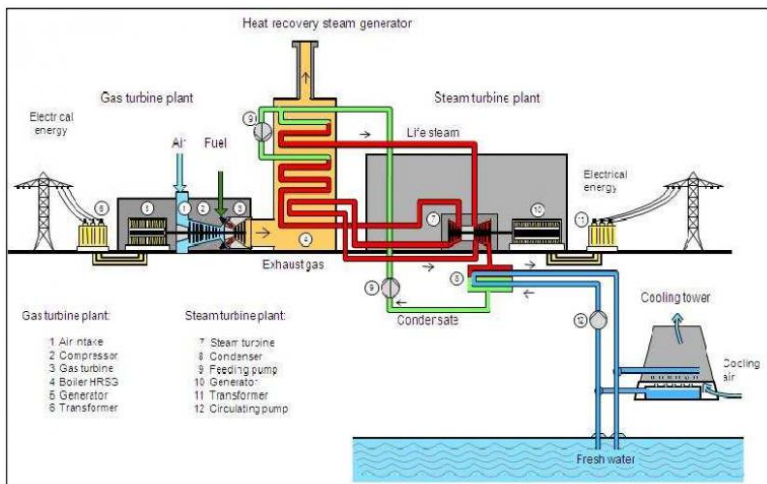
Dalam sistem tenaga listrik, sumber daya energi menempati peringkat yang sangat penting. Salah satu bentuk energi yang sangat mudah dimanfaatkan adalah energi listrik, Di zaman modern seperti saat ini, Sistem tenaga listrik telah terinterkoneksi yang dimana sistem tersebut sangat tergantung pada sistem kontrol untuk memanfaatkan secara optimal sumber daya yang ada. Permasalahan utama yang dihadapi oleh sistem tenaga listrik modern seperti yang dijelaskan sebelumnya yaitu kestabilan sistem tenaga listrik.

Untuk lebih memahami lagi tentang kestabilan dari sistem tenaga, perlu diketahui tentang apa yang dinamakan “Sistem Tenaga Listrik” yang akan merepresentasikan cara pembangkitan, penyaluran, dan

pendistribusian energi listrik. Secara garis besar sistem tenaga listrik terdiri dari:

2.1.1 Pembangkit Listrik (*Power Plant*)[11]

Pembangkit listrik adalah suatu alat yang dapat membangkitkan dan memproduksi tegangan listrik dengan cara mengubah suatu energi tertentu menjadi energi listrik, dimana terdapat turbin sebagai penggerak mula (*prime mover*) dan generator yang membangkitkan listrik. Tenaga listrik umumnya dibangkitkan pada dalam pusat-pusat pembangkit listrik (*power plant*) seperti PLTA (pembangkit Listrik Tenaga Air), PLTU (Pusat Listrik Tenaga Uap), PLTG (Pusat Listrik Tenaga Gas), PLTN (Pusat Listrik Tenaga Nuklir), dan PLTD (Pusat Listrik Tenaga Diesel) lalu disalurkan melalui saluran transmisi setelah terlebih dahulu dinaikkan tegangannya oleh transformator *step-up* yang ada dipusat listrik. Umumnya pembangkit listrik terdapat gardu induk. Peralatan utama pada gardu induk antara lain: transformer yang berfungsi untuk menaikkan tegangan generator (11 kV s/d 24 kV) menjadi 70 kV, 154 kV, 220kV atau 500 kV kemudian disalurkan melalui saluran transmisi dan juga peralatan pengaman dan pengatur, blok diagram dari salah satu PLTU terdapat pada gambar 2.1



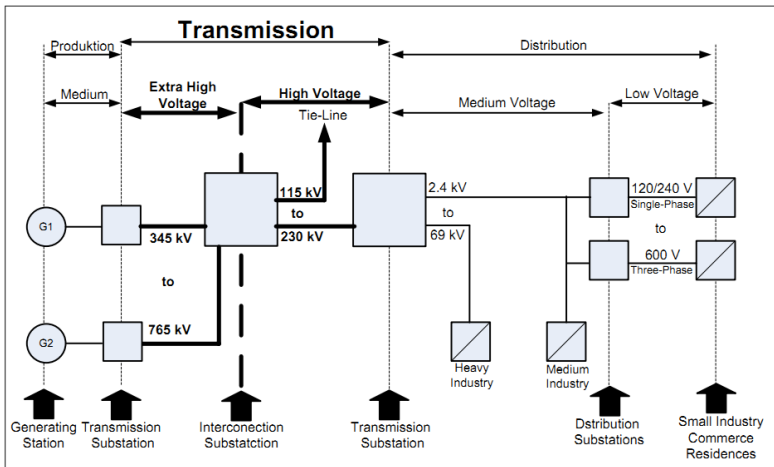
Gambar 2.1 Blok diagram dari pembangkit PLTU

2.1.2 Saluran Transmisi (*Transmission Line*)[15]

Transmisi tenaga listrik merupakan proses penyaluran tenaga listrik dari tempat pembangkit tenaga listrik (*power plant*) hingga *substation* distribusi sehingga dapat disalurkan sampai pada konsumen pengguna listrik melalui suatu bahan konduktor. Standar tegangan pada sistem transmisi di Indonesia diklasifikasikan sebagai tegangan ekstra tinggi (TET) yaitu dengan nominal 500 kV dan tegangan tinggi (TT) dengan nominal 70 kV dan 150 kV. Kontruksi transmisi terdiri dari dua yaitu Saluran Udara dan Saluran Kabel yang terdiri dari,

1. Saluran Udara (*Overhead Lines*) Tegangan Tinggi (SUTT) / Tegangan Ekstra Tinggi (SUTET)
2. Saluran Kabel Tanah (*Underground Line*) Tegangan Tinggi (SKTT)
3. Saluran Kabel Laut (*Submarine Line*) Tegangan Tinggi (SKLTT)

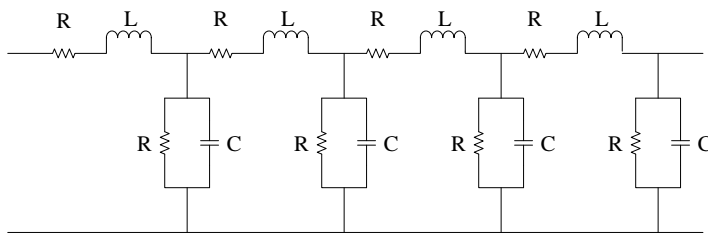
Namun disini yang dibahas, adalah Transmisi dengan saluran udara..



Gambar 2.2 Diagram blok umum sistem tenaga listrik

Pada sistem tenaga listrik, Tujuan tegangan dinaikkan agar dapat meminimalisir rugi-rugi daya dan drop tegangan, karena penyaluran

pasti melalui jalur yang panjang, semakin panjang jalur maka akan semakin berpengaruh pada rugi daya, Selain itu jarak antara pembangkit dengan beban yang cukup jauh, akan menimbulkan adanya penurunan kualitas tegangan. Sehingga dibutuhkan suatu peralatan untuk memperbaiki kualitas tegangan dan diletakkan pada saluran yang mengalami drop tegangan. Besarnya rugi-rugi ditentukan oleh konduktor dan panjang saluran.



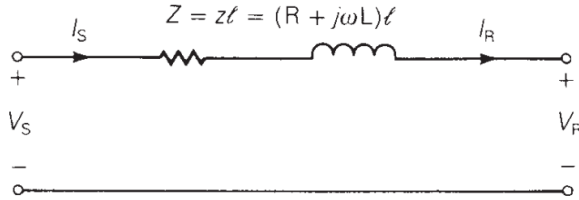
Gambar 2.3 Rangkaian pengganti saluran transmisi

Panjang saluran transmisi akan berpengaruh terhadap nilai parameter dari saluran transmisi yang mempengaruhi terhadap tegangan bus dan daya yang mengalir pada saluran. Dari gambar 2.3 menjelaskan parameter-parameter saluran antara lain tahanan (*resistansi*), reaktansi, kapasitansi, dan konduktansi yang tersebar. Sehingga dalam pemodelan saluran transmisi kedalam rangkaian simulasinya tergantung dari panjang saluran dan tingkat ketelitian. Berdasarkan panjangnya, saluran transmisi dibagi menjadi tiga, yaitu:

1. Saluran trasnmisi pendek (*Short line*)
2. Saluran trasnmisi menengah (*Medium line*)
3. Saluran trasnmisi panjang (*Long line*)

2.1.2.1 Saluran Transmisi Pendek (*Short Line*)

Pada saluran transmisi pendek (*short line*) yaitu yang panjangnya < 80 km (di bawah 50 mil). Pada saluran model ini besar kapasitansi ke tanah sangat kecil, dengan demikian besar arus bocor ke tanah kecil terhadap arus beban, maka dalam hal ini kapasitansi ke tanah dapat diabaikan. Rangkain ekivalen salutan transmisi jarak pendek dapat dilihat pada gambar 2.4.



Gambar 2.4 Rangkaian ekivalen saluran transmisi jarak pendek [15]

Keterangan gambar:

V_S = tegangan ujung kirim atau ujung generator.

I_S = arus ujung kirim atau ujung generator.

V_R = tegangan ujung terima atau ujung beban.

I_R = arus ujung terima atau ujung beban.

$Z = (R + jX_L) = \text{impedansi saluran.}$

Rangkaian diatas dapat diselesaikan seperti halnya rangkaian AC seri sederhana yang dimodelkan dengan nilai R dan L . Karena tidak terdapat cabang parallel (shunt), arus pada ujung pengirim (I_S) sama dengan arus ujung penerima (I_R).

$$I_S = I_R \quad (2.1)$$

Tegangan pada ujung pengirim yaitu:

$$V_S = V_R + I_R \cdot Z \quad (2.2)$$

Perubahan faktor daya beban terhadap regulasi tegangan (*voltage regulation*) saluran paling mudah dimengerti pada saluran jarak pendek. Regulasi tegangan pada saluran transmisi adalah kenaikan tegangan pada ujung penerima yang ditemukan dalam presentase tegangan beban penuh jika beban penuh dengan faktor daya tertentu dilepaskan sedangkan pada ujung pengirim dibuat tetap. Persamaan regulasi tegangan adalah:

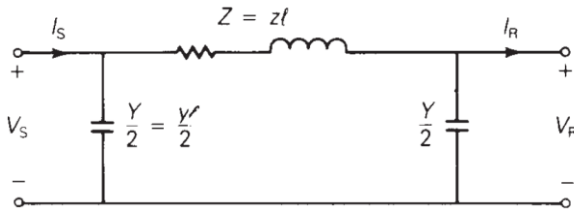
$$VR\% = \frac{|V_R \cdot NL + V_R \cdot FL|}{|V_R \cdot FL|} \times 100\% \quad (2.3)$$

2.1.2.2 Saluran Transmisi Menengah (*Medium Line*)

Pada saluran transmisi menengah adalah saluran transmisi yang memiliki panjang saluran antara 80 km (50 mile) sampai dengan 250 km (150 mile). Nilai kapasitansi pada saluran menengah relatif cukup besar, sehingga tidak dapat diabaikan dalam perhitungan. Sehingga seluruh admitansi shunt saluran terpusat pada cabang shunt, dimana pada saluran transmisi menengah dibedakan menjadi dua model, yaitu:

1. Saluran transmisi menengah nominal T yaitu saluran transmisi dengan kapasitansi dipusatkan pada satu titik dan impedansi serinya terbagi dua pada kedua cabang serinya.
2. Saluran transmisi menengah nominal PI (π) yaitu saluran transmisi dengan kapasitansi dipusatkan pada dua titik dan impedansi serinya dipusatkan satu titik pada cabang serinya.

Untuk saluran model nominal PI (π) keseluruhan admintasi shunt saluran dibagi dua sama besar dan ditempatkan masing-masing pada ujung penerima, sehingga dinamakan rangkaian berbentuk nominal PI. Untuk mendapatkan suatu rumus untuk V_R kita akan berpedoman pada gambar 2.5 di bawah ini.



Gambar 2.5 Rangkaian nominal PI saluran transmisi jarak menengah [15]

Arus pada kapasitansi pada ujung penerima adalah $V_R Y/2$ dan arus pada cabang seri adalah $I_R + V_R Y/2$. Maka diperoleh persamaan:

$$V_S = \left(1 + \frac{1}{2}YZ\right)V_R + I_R \cdot Z \quad (2.4)$$

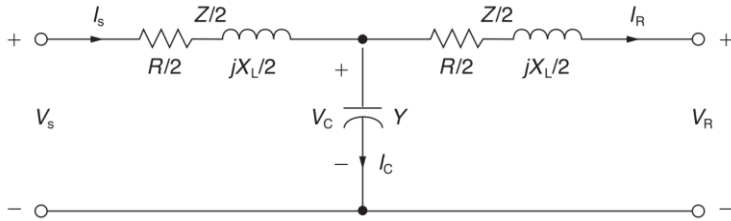
Arus pada kapasitansi shunt pada ujung pengirim adalah $V_S Y/2$ dan arus pada cabang seri adalah $I_R + V_R Y/2$. Sehingga jika ditambahkan arus pada ujung seri diperoleh arus I_S sebesar:

$$I_S = V_S \frac{Y}{2} + V_R \frac{Y}{2} + I_R \quad (2.5)$$

Dari persamaan 2.4 dan 2.5 kita dapatkan:

$$I_S = Y \left(1 + \frac{1}{4} YZ \right) V_R + \left(1 + \frac{1}{2} YZ \right) I_R \quad (2.6)$$

Persamaan untuk rangkaian yang sesuai dapat diturunkan untuk rangkaian T nominal, gambar 2.6 menunjukkan rangkain pengganti untuk dari saluran tipe T nominal.



Gambar 2.6 Rangkaian nominal T saluran transmisi jarak menengah [15]

$$V_S = Z \left(1 \times \frac{1}{2} YZ \right) V_R + \left(1 \times \frac{1}{4} YZ \right) I_R \quad (2.7)$$

$$I_S = Y V_R \left(1 \times \frac{1}{2} YZ \right) I_R \quad (2.8)$$

Dari persamaan-persamaan yang didapatkan maka dapat ditemukan dalam bentuk konstanta pengganti dari rangkain umum saluran transmisi. Konstanta ABCD sering disebut konstanta rangkain umum saluran transmisi tersebut. Pada umumnya konstanta berupa bilangan kompleks. A dan D adalah tanpa dimensi dan keduanya akan sama bila salurannya dilihat dari kedua ujung yang sama. Dimensi untuk B dan C masing-masing adalah ohm dan mho. Konstanta tersebut berlaku untuk jaringan empat terminal-linear, pasif, dan bilateral yang mempunyai dua pasang terminal. Maka didapatkan:

$$V_S = AV_R + BI_R \quad (2.9)$$

$$I_S = CV_R + DI_R \quad (2.10)$$

Dimana, untuk rangkaian PI

$$A = D = 1 + \frac{1}{2} YZ$$

$$B = Z$$

$$C = Y (1 + \frac{1}{4} YZ)$$

Sedangkan untuk rangkaian T

$$A = D = 1 + \frac{1}{2} YZ$$

$$B = Z (1 + \frac{1}{4} YZ)$$

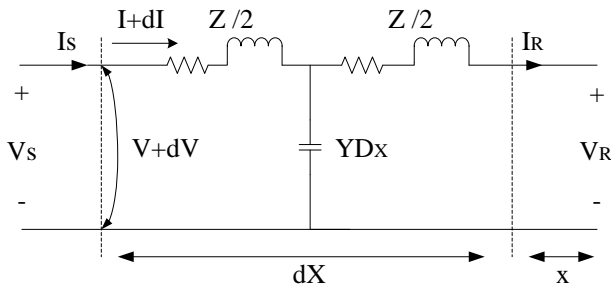
$$C = Y$$

2.1.2.3 Saluran Transmisi Jarak Panjang (*Long Line*)

Pada saluran transmisi panjang adalah saluran transmisi yang memiliki panjang lebih dari 250 km (150 mile). Rangkaian T-Nominal dan Pi-Nominal tidak dapat menjelaskan saluran transmisi panjang dengan tepat. Perbedaan kedua rangkaian ekivalen tersebut dengan saluran transmisi yang sebenarnya menjadi sangat besar. Tetapi masih mungkin untuk mendapatkan rangkaian ekivalen dari saluran transmisi panjang dengan merepresentasikannya secara tepat dengan jaringan parameter terpusat, asal pengukuran-pengukuran hasilnya dilakukan pada ujung-ujung saluran. Karakteristik urutan positif ditentukan dengan konstanta ABCD yang didefinisikan dengan persamaan:

$$V_S = AV_R + BI_R \quad (2.11)$$

$$I_S = CV_R + DI_R \quad (2.12)$$



Gambar 2.7 Rangkaian nominal T saluran transmisi jarak panjang [15]

Dimana V_S dan V_R adalah tegangan ke netral, I_S dan I_R adalah arus saluran. Koefisien dari saluran transmisi ini merupakan hasil pemecahan secara hiperbolis kedalam konstanta karakter distribusi.

$$\begin{aligned}
 A &= \cos (ZY)^{-2} \\
 &= \left[1 + \frac{YZ}{2!} + \frac{Y^2 Z^2}{4!} + \frac{Y^3 Z^3}{6!} + \dots \right] \\
 B &= \sqrt{Z/Y} \sin \sqrt{ZY} \\
 &= \left[1 + \frac{YZ}{6} + \frac{Y^2 Z^2}{120} + \frac{Y^3 Z^3}{5040} + \dots \right] \\
 C &= \sqrt{Z/Y} \sin \sqrt{ZY} \\
 &= \left[1 + \frac{YZ}{6} + \frac{Y^2 Z^2}{120} + \frac{Y^3 Z^3}{5040} + \dots \right] \\
 D &= A
 \end{aligned}$$

Dimana:

- $Y = R + jX$ = impedansi total saluran = $(r + jX)l$
- $Z = G + jB$ = suseptansi total saluran = $(g + jb)l$
- G = konduktansi dalam mho per unit dari panjang saluran (umumnya diabaikan)
- B = suseptansi kapasitif dalam mho per unit dari panjang saluran
- L = panjang saluran

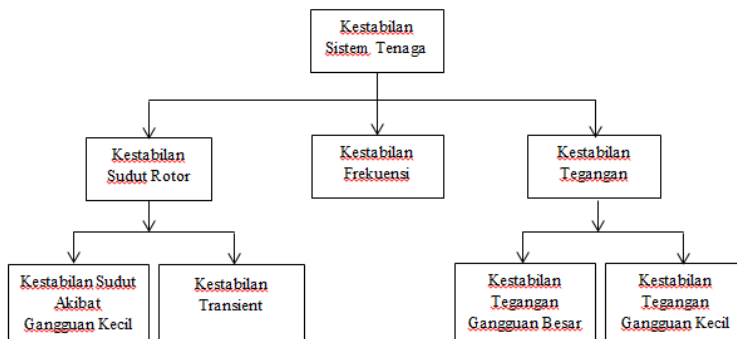
2.2 Stabilitas Tenaga Listrik

Dalam suatu sistem tenaga listrik yang mempunyai susunan sistem yang kompleks, mulai dari generator, transmisi, beban, dan peralatan listrik pendukung lainnya maka diperlukan suatu kestabilan sistem. Kestabilan sistem tenaga listrik itu sendiri didefinisikan sebagai kemampuan dari suatu sistem tenaga untuk tetap dalam kondisi beroperasi dengan seimbang saat terjadi gangguan dan dapat mengembalikan ke kondisi seimbang setelah terjadi gangguan pada sistem tersebut [6].

Steady state adalah kondisi dari suatu sistem tak berubah dengan berjalannya waktu atau dengan kata lain, konstan, turunan parsial terhadap waktu adalah nol, untuk daerah operasinya sebuah sistem dengan karakteristik perubahan yang lambat dan bertahap, ataupun dapat disebut pula kemampuan dari suatu sistem tenaga mempertahankan sinkronisasi antara mesin-mesin setelah mengalami gangguan kecil.

Oleh karena itu, perlu pengklasifikasian kestabilan sistem tenaga berdasarkan faktor kontribusi yang menyebabkan ketidakstabilan. Sehingga dapat diklasifikasikan menjadi:

1. Kestabilan sudut rotor
2. Kestabilan frekuensi
3. Kestabilan tegangan



Gambar 2.8 Klasifikasi kestabilan sistem tenaga [6]

2.2.1 Kestabilan Sudut Rotor

Kestabilan sudut rotor (*rotor angle stability*) merupakan kemampuan dari beberapa mesin sinkron yang saling terinterkoneksi pada suatu sistem tenaga untuk mempertahankan kondisi sinkron dalam kondisi normal dan setelah terjadi gangguan. Hal ini berkaitan dengan kemampuan mesin sinkron untuk menyeimbangkan antara torsi elektromagnetik dengan torsi mekanik, setiap mesin sinkron dalam suatu sistem [7]. Kestabilan sudut rotor secara umum dibedakan menjadi dua bagian, yaitu:

1. Kestabilan sudut rotor akibat gangguan besar atau gangguan transien

Kestabilan ini berkaitan dengan kemampuan sistem tenaga listrik untuk mempertahankan kondisi sinkron akibat gangguan besar seperti gangguan hubung singkat pada saluran transmisi [6]. Respon sistem akibat gangguan besar ini melibatkan besarnya penyimpangan sudut rotor generator dan dipengaruhi juga oleh ketidaklinearan hubungan sudut daya.

2. Kestabilan sudut rotor akibat gangguan kecil

Kestabilan ini berkaitan dengan kemampuan sistem tenaga listrik untuk mempertahankan kondisi sinkron akibat gangguan kecil [6]. Studi kestabilan ini mempunyai kurun waktu 10-20 detik setelah gangguan dan tergantung pada operasi awal sistem, selain itu Kestabilan akibat gangguan kecil ini bergantung pada kondisi inisial operasi dari sistem. Ketidakstabilan mungkin terjadi dalam dua bentuk yaitu peningkatan sudut rotor dengan mode periodik karena kurangnya torsi sinkron atau peningkatan osilasi rotor karena kurangnya torsi damping.

2.2.2 Kestabilan Frekuensi

Kestabilan ini merupakan kemampuan sistem tenaga untuk mempertahankan kestabilan frekuensi ketika terjadi gangguan pada sistem yang besar akibat ketidakseimbangan antara suplai daya dan beban. Biasanya gangguan ini berupa perubahan pembangkit atau beban yang signifikan [8]. Pentingnya menjaga frekuensi berkaitan erat dengan upaya untuk menyediakan sumber energi yang berkualitas bagi konsumen. Pasokan energi dengan frekuensi yang berkualitas baik akan menghindarkan peralatan konsumen dari kerusakan (umumnya alat hanya dirancang untuk dapat bekerja secara optimal pada batasan frekuensi tertentu saja 50 s.d 60 Hz).

Klasifikasi dari kestabilan frekuensi diklasifikasikan menjadi 2 yaitu jangka panjang dan jangka pendek. Kestabilan frekuensi jangka panjang disebabkan oleh kontrol *governor* tidak bekerja ketika terdapat gangguan. Rentang waktu fenomena jangka panjang yaitu puluhan detik hingga beberapa menit. Kestabilan frekuensi jangka pendek adalah terjadinya perubahan beban yang besar sehingga generator tidak mampu untuk memenuhi kebutuhan daya pada sistem.

Pada Kestabilan frekuensi diperlukan Penyesuaian daya aktif. Hal ini dilakukan dengan mengatur besarnya kopel penggerak generator. Gangguan-gangguan yang terjadi pada sistem frekuensi:

1. Penyimpangan terus menerus (continuous deviation), yaitu frekuensi diluar batasnya pada saat yang lama (secara terus-menerus), frekuensi standart 50 Hz dengan toleransi 0,6 Hz (49,6 – 50,6) Hz.
2. Penyimpangan sementara (transient deviation), yaitu kenaikan atau penurunan frekuensi secara tiba-tiba dan sesaat.

2.2.3 Kestabilan Tegangan

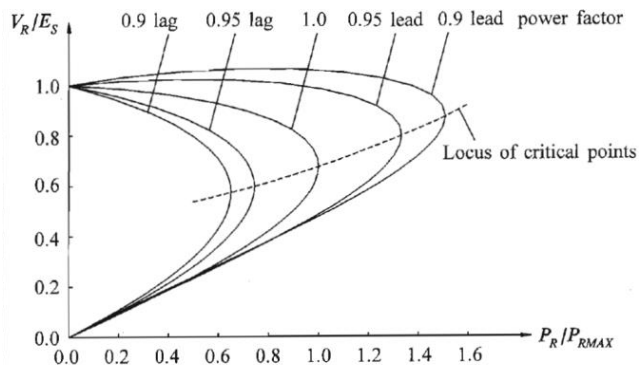
Kestabilan tegangan merupakan kemampuan dari sistem tenaga untuk menjaga kestabilan tegangan pada semua bus di sistem setelah mengalami gangguan dan mengembalikannya ke kondisi normal. Hal ini bergantung pada kemampuan untuk menjaga kesetimbangan antara *supply* daya pembangkit dan beban dari suatu sistem. Biasanya gangguan yang terjadi adalah lepasnya atau bertambahnya beban dan generator yang signifikan sehingga tegangan menjadi drop [6]. Ketidakstabilan dapat mengakibatkan bentuk penurunan atau kenaikan tegangan pada beberapa bus. Hal yang mungkin terjadi karena ketidakstabilan tegangan adalah kehilangan beban pada suatu area atau lepasnya jaringan transmisi karena bekerjanya relay proteksi atau karena terjadi kontingensi/lepasnya saluran transmisi dan hilangnya pembangkit besar dari sistem.

Kriteria kestabilan untuk suatu tegangan dapat dipenuhi jika besarnya tegangan pada setiap bus dalam suatu sistem yang sedang beroperasi akan meningkat besarnya seiring dengan meningkatnya injeksi daya reaktif pada bus yang sama. Suatu sistem dikatakan tidak stabil jika di dalam sistem tersebut sedikitnya terdapat sebuah bus yang mengalami penurunan yang besar tegangannya bersamaan pada saat injeksi daya reaktif diberikan pada bus yang sama. Pada kestabilan tegangan terdapat 2 hal penting yaitu gangguan besar dan gangguan kecil. Kestabilan gangguan besar adalah kemampuan dari sistem tenaga untuk menjaga tegangan *steady* setelah mengalami gangguan besar seperti *generator outage* atau hilangnya pembangkitan dan *short circuit* [6]. Penentuannya dengan pengujian pada sistem tenaga selama periode waktu tertentu untuk mengamati interaksi dan kinerja peralatan *tap changer* trafo, dan pengaman sistem tenaga listrik ketika terjadi gangguan. Kestabilan tegangan gangguan kecil yaitu kemampuan untuk mempertahankan tegangan sistem tenaga listrik ketika terjadi gangguan kecil seperti terjadi perubahan beban kecil.

Dalam waktu terjadinya gangguan kestabilan tegangan ada 2 yaitu jangka pendek mengakibatkan kedip tegangan (*voltage sag*) dan kenaikan tegangan (*swells*). Serta Gangguan kestabilan tegangan jangka panjang mengakibatkan Fluktuasi Tegangan, Harmonik Tegangan, dan Ketidak seimbangan tegangan.

2.2.3.1 Analisa Kurva P-V [7, 15, 16]

Pada sistem tenaga listrik, diperlukan metode yang dapat menggambarkan kondisi tegangan di setiap bus sistem. Hal itu diperlukan karena berkaitan dengan menganalisa stabilitas tegangan. Kurva PV tersebut merepresentasikan karakteristik beban dalam suatu bus terhadap tegangan, terlihat bahwa semakin bagus faktor daya beban, maka daya aktif (P) yang dapat ditransfer menuju beban menjadi semakin meningkat. Dengan menganalisa kurva P-V dalam stabilitas tegangan, akan diketahui berapa besar daya maksimum yang dapat ditransfer dengan batasan tegangan yang masih diijinkan. Kurva P-V diperoleh dengan melakukan penambahan beban pada bus tertentu sehingga, pada bus tersebut mengalami kondisi yang kritis atau biasanya dinamakan *under voltage*. Bentuk Kurva P-V ditunjukkan pada gambar 2.9



Gambar 2.9 Kurva P-V [7,15]

Garis putus-putus pada gambar 2.9 tersebut memperlihatkan titik lokasi yang menyatakan sebagai batas titik kritis. Titik ini menyatakan batas kemampuan beban pada keadaan steady state untuk stabilitas tegangan jaringan, sedangkan bagian atas dari titik kritis menyatakan kondisi operasi stabil dan di bawah titik kritis menyatakan kondisi operasi tidak stabil [15].

Dalam stabilitas tegangan ada cara untuk penentuan Batas stabilitas tegangan untuk suatu bus, yaitu :

1. Pengukuran berturut-turut untuk tegangan Dan daya aktif untuk melihat verifikasi daya maksimal Titik sudah tercapai atau

- tidak (ini dilakukan dengan mengecek arah Besarnya tegangan dan beban daya aktif).
2. Jika titik operasi berada di luar daya maksimum, bagian bawah kurva PV didekati dengan Fungsi kuadratik.
 3. Titik *under voltage* diprediksi oleh Perbandingan kurva PV dan karakteristik beban.
 4. Prediksi batas stabilitas tegangan diperbarui ketika terjadi Perubahan permintaan daya.

2.2.3.2 Sensitivitas Tegangan [7,10,16]

Bus yang ada pada sistem sering mengalami gangguan disaat ada penambahan beban yang signifikan yang biasanya disebut gangguan *under voltage*, maka diperlukan sebuah metode yang bisa menentukan bus yang sensitive ketika terjadi perubahan beban yang signifikan ketika ada gangguan, metode tersebut adalah sensitivitas tegangan yang merupakan keadaan dimana tegangan pada bus ketika dilakukan penambahan beban, atau dengan keadaan normal, lalu dilakukan aliran daya, keadaan beban pada bus beban tidak mengalami penurunan. Penurunan tegangan pada bus beban diakibatkan dengan adanya suatu penambahan beban (beban P dan Q). jika penambahan beban pada bus dan pada sumber listrik tidak dilakukan penambahan sumber, maka drop tegangan akan terjadi pada bus tersebut.

Dengan melakukan perhitungan terhadap perubahan tegangan (ΔV) pada masing-masing bus beban, didapatkan suatu bus yang paling sensitive terhadap perubahan beban. Sehingga tegangan pada bus sensitive tersebut akan mengalami drop tegangan setiap penambahan beban P. Adapun persamaan drop tegangan pada bus adalah sebagai berikut

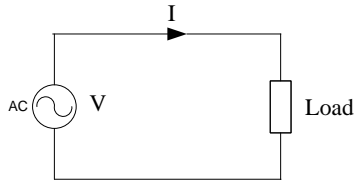
$$\text{Bus sensitif} = dV_i/dP_{\text{total}} \quad (2.13)$$

2.3 Daya pada Sistem Tenaga Listrik

Daya listrik menggambarkan transfer energi suatu peralatan listrik yang ditemukan dalam tegangan dan arus.. Daya listrik biasanya ditemukan dalam satuan Watt atau Horsepower (HP), Horsepower merupakan satuan daya listrik dimana 1 HP setara 746 Watt atau lbft/second. Sedangkan Watt merupakan unit daya listrik dimana 1 Watt

memiliki daya setara dengan daya yang dihasilkan oleh perkalian arus 1 ampere dan tegangan 1 volt. Daya disemukan dalam P, tegangan disemukan dalam V dan arus disemukan dalam I, sehingga besarnya daya disemukan [10] :

$$P = VI \cos \varphi \quad (2.14)$$



Gambar 2.10 Arah aliran arus listrik

2.3.1 Daya Aktif dan Reaktif [10,11]

Pada sistem tenaga listrik, terdapat dua daya yang mengalir yaitu daya aktif dan daya reaktif. Daya aktif (*active power*) adalah daya yang terpakai untuk melakukan energi sebenarnya. Satuan daya aktif adalah Watt. Daya ini digunakan secara umum oleh konsumen dan dikonversikan dalam bentuk kerja.

Pada daya listrik dibedakan berdasarkan bentuknya ada 2 yaitu DC dan AC. Pada arus listrik DC, dirumuskan sebagai perkalian arus listrik dengan tegangan.

$$P = VI \quad (2.15)$$

Namun pada listrik AC perhitungan daya menjadi sedikit berbeda karena melibatkan faktor daya atau sering disebut $\cos \varphi$. Faktor daya adalah perbandingan daya aktif dengan daya reaktif.

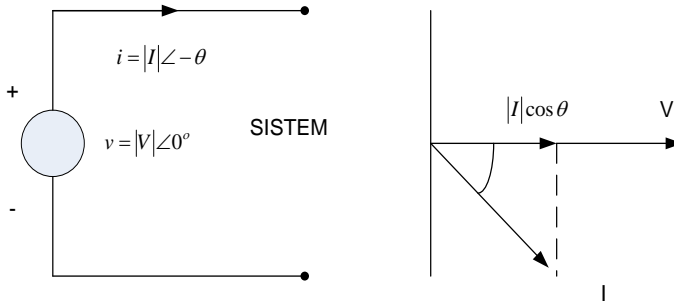
$$P = VI \cos \varphi \quad (2.16)$$

Daya reaktif adalah Daya yang dibutuhkan untuk membangkitkan medan magnet. Dari pembentukan medan magnet maka akan terbentuk fluks medan magnet. Contoh daya yang menimbulkan daya reaktif adalah motor, transformator, dan lain – lain. Satuan daya reaktif adalah Var.

$$Q = VI \sin \varphi \quad (2.17)$$

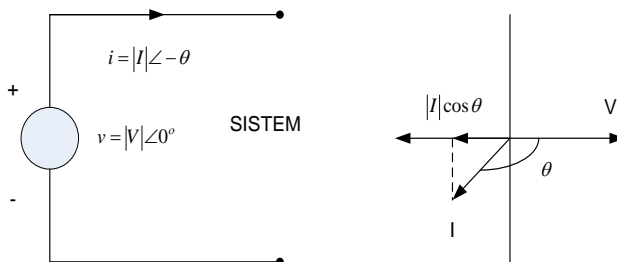
2.3.2 Aliran Daya Aktif [11]

Apabila $|I| \cos \theta$ sefase dengan V , berarti daya listrik yang dibangkitkan sumber (generator) dan mengalir menuju sistem (arus keluar dari terminal positif).



Gambar 2.11 Diagram fasor aliran daya aktif dan I sefase [11]

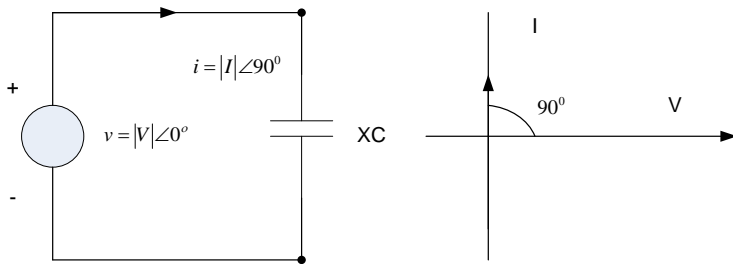
Bila $|I| \cos \theta$ berbeda phase 180° dengan V , maka daya listrik diserap sumber (motor) dan arus mengalir menuju terminal positif dari sumber.



Gambar 2.12 Diagram fasor aliran daya aktif dan I berbeda phase [11]

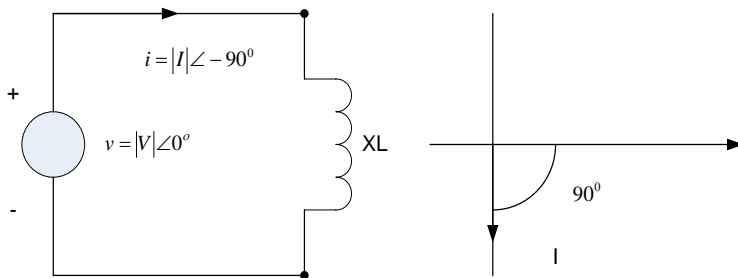
2.3.3 Aliran Daya Reaktif [11]

Daya reaktif sebesar $I^2 X_C$ (dengan tanda negatif) diberikan pada kapasitor atau sumber menerima daya reaktif dari kapasitor. Arus I mendahului (*leading*) 90° terhadap V . $Q = I_m(VI^*)$ mempunyai tanda negatif, sebagaimana ditampilkan pada gambar 2.13.



Gambar 2.13 Diagram fasor aliran daya reaktif I *lead* 90° terhadap V [11]

Daya reaktif sebesar $I^2 X_L$ (dengan tanda positif) berarti induktansi atau induktansi menyerap daya reaktif. Arus I tertinggal (*lagging*) 90° terhadap V . $Q = I_m(VI^*)$ mempunyai tanda positif, sebagaimana ditampilkan pada gambar 2.14 hubungan antara tegangan dan arus.

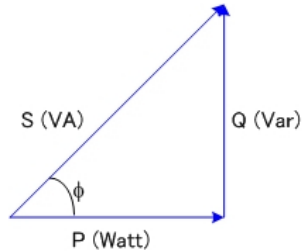


Gambar 2.14 Diagram fasor aliran daya reaktif I *lagg* 90° terhadap V [11]

2.3.4 Daya Kompleks [10,12]

Daya Kompleks adalah representasi daya yang dihasilkan dari perkalian antara tegangan rms dan arus rms dalam suatu jaringan atau daya yang merupakan hasil penjumlahan trigonometri daya aktif dan daya reaktif. Satuan daya kompleks adalah VA.

Hubungan daya aktif, daya reaktif dan daya kompleks menghasilkan sebuah istilah yang disebut dengan segitiga daya. Gambar 2.15 memperlihatkan segitiga daya, dimana garis *real* merepresentasikan daya aktif, garis imajiner merepresentasikan daya reaktif dan garis diagonal merepresentasikan daya kompleks



Gambar 2.15 Penjumlahan trigonometri daya aktif, reaktif dan semu

Dimana,

$$\begin{aligned} S &= P + jQ \\ &= \sqrt{P^2 + Q^2} \end{aligned} \quad (2.18)$$

Untuk mendapatkan daya satu phasa, maka dapat diturunkan persamaannya seperti di bawah ini:

$$S = P + jQ \quad (2.19)$$

Dari gambar 2.15 terlihat bahwa

$$P = V.I \cos \varphi \quad (2.20)$$

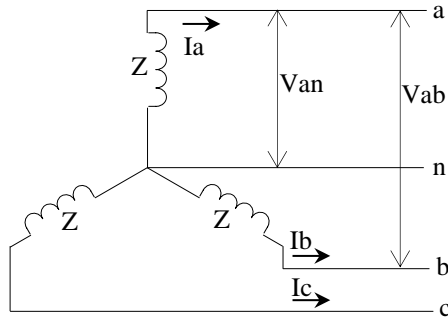
$$Q = V.I \sin \varphi \quad (2.21)$$

Maka,

$$\begin{aligned} S_{1\varphi} &= V.I \cos \varphi + j V.I \sin \varphi \\ &= V.I (\cos \varphi + j \sin \varphi) \\ &= V.I e^{j\varphi} \\ &= V.I \angle \varphi \\ &= V.I * \end{aligned} \quad (2.22)$$

Sedangkan untuk rangkaian tiga phasa mempunyai 2 bentuk hubungan yaitu :

a). Hubungan Wye (Y) [10,12]



Gambar 2.16 Hubungan Wye (Y)

Pada Gambar 2.16 merupakan Sistem tiga fase hubungan Y yang merupakan sistem yang mengumpulkan simpul dari masing-masing fase menjadi satu sehingga membentuk titik netral, baik pada sisi sumber maupun beban.

Pada gambar 2.16 dapat dilihat bahwa, dimana pada hubungan Wye (Y) berlaku:

$$V_{an} = V_{bn} = V_{cn} = V_P ; \text{ Tegangan fasa} \quad (2.23)$$

$$V_{an} = V \angle 0^\circ \quad (2.24)$$

$$V_{bn} = V \angle -120^\circ \quad (2.25)$$

$$V_{cn} = V \angle 120^\circ$$

$$V_{ab} = V_{ac} = V_{bc} = V_L ; \text{ Tegangan line} \quad (2.26)$$

$$V_{ab} = \sqrt{3} V \angle 30^\circ \quad (2.27)$$

$$V_{bc} = \sqrt{3} V \angle -90^\circ \quad (2.28)$$

$$V_{ca} = \sqrt{3} V \angle 150^\circ$$

$$I_R = I_S = I_T = I_L (I_P) ; \text{ Arus fasa / Arus saluran} \quad (2.29)$$

$$I_a = V_{an}/Z \angle -\theta \quad (2.30)$$

$$I_b = V_{bn}/Z \angle -120 - \theta \quad (2.31)$$

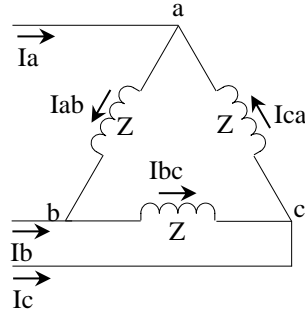
$$I_c = V_{cn}/Z \angle 120 - \theta$$

Maka jika disederhanakan hubungan Wye(Y), akan berlaku hubungan :

$$I_L = I_P \quad (2.32)$$

$$V_L = 3 V_P \quad (2.33)$$

b). Hubungan Delta (Δ) [10,12]



Gambar 2.17 Hubungan Delta (Δ)

Pada Gambar 2.17 merupakan Sistem tiga fase hubungan delta (Δ). Dari gambar tersebut terlihat bahwa masing-masing ujung belitan fase terhubung dengan fase lainnya sehingga membentuk segitiga.

Di mana :

$$I_{RS} = I_{ST} = I_{TR} = I_P ; \text{ Arus fase}$$

$$I_{ab} = I \angle 0^\circ \quad (2.34)$$

$$I_{bc} = I \angle -120^\circ \quad (2.35)$$

$$I_{ca} = I \angle 120^\circ \quad (2.36)$$

$$I_R = I_S = I_T = I_L ; \text{ Arus saluran}$$

$$I_a = \sqrt{3} I \angle -30^\circ \quad (2.37)$$

$$I_b = \sqrt{3} I \angle -150^\circ \quad (2.38)$$

$$I_c = \sqrt{3} I \angle 90^\circ \quad (2.39)$$

$$V_{RS} = V_{ST} = V_{TR} = V_L (V_P) ; \text{ Tegangan antar fasa}$$

$$V_L = V_P \quad (2.40)$$

Dari kedua macam rangkaian di atas, untuk mendapatkan daya tiga phasanya maka dapat digunakan rumus:

$$S(3) = 3 \cdot V_L \cdot I_L \quad (2.41)$$

2.4 Faktor Daya [12]

Dalam pembahasan sebelumnya, dibahas salah satunya Daya aktif, pada persamaan rumus daya aktif terdapat Faktor daya ($\cos\phi$). Untuk dapat Faktor daya ($\cos\phi$) didefinisikan sebagai rasio perbandingan antara daya aktif (Watt) dan daya kompleks (VA) yang digunakan dalam sirkuit AC atau beda sudut fasa antara V dan I yang biasanya ditemukan dalam $\cos \phi$.

$$\begin{aligned} \text{Faktor Daya} &= \text{Daya Aktif (P)} / \text{Daya kompleks (S)} \\ &= V.I \cos \phi / V.I \\ &= \cos \phi \end{aligned} \quad (2.42)$$

Faktor daya mempunyai nilai range antara 0 – 1 dan dapat juga ditemukan dalam persen. Faktor daya yang bagus apabila bernilai mendekati satu.

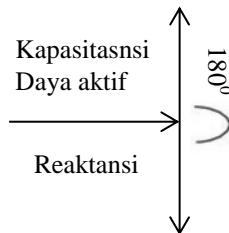
Jika pf lebih kecil dari 0,85 maka kapasitas daya aktif (kW) yang digunakan akan berkurang. Kapasitas itu akan terus menurun seiring dengan menurunnya pf sistem kelistrikan. Akibat menurunnya pf maka akan timbul beberapa persoalan diantaranya :

- Mutu listrik menjadi rendah karena jatuh tegangan (*voltage drops*).
- Membesarnya penggunaan daya listrik kWh karena rugi-rugi.
- Membesarnya penggunaan daya listrik kVAR.

Seperti yang ditunjukkan gambar 2.18, daya reaktif yang dibutuhkan oleh induktansi selalu mempunyai beda fasa 90° dengan daya aktif. Kapasitor menyuplai kVAR dan melepaskan energi reaktif yang dibutuhkan oleh induktor. Ini menunjukkan induktansi dan kapasitansi mempunyai beda fasa 180° . Memasang kapasitor pada jaringan AC untuk menurunkan medan dari daya reaktif. Selain itu, pemasangan kapasitor dapat menghindari :

- Jatuh tegangan pada ujung *line*.
- Kenaikan arus/suhu pada kabel, sehingga mengurangi rugi-rugi.

- Trafo kelebihan beban (overload), sehingga memberikan tambahan daya yang tersedia.



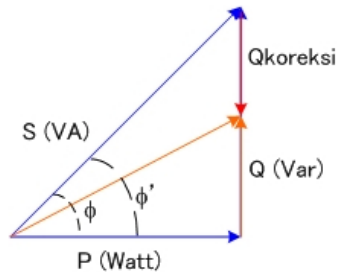
Gambar 2.18 Hubungan daya aktif, reaktif dan kapasitansi

2.4.1 Koreksi Faktor Daya[12]

Dalam kehidupan nyata penggunaan energi listrik tidak terlepas dengan salah satunya faktor daya ($\cos\phi$). Pada hakikatnya Faktor daya merupakan besaran yang menunjukkan seberapa efisien jaringan yang kita miliki dalam menyalurkan daya yang bisa kita manfaatkan. Faktor daya dibatasi dari 0 hingga 1, semakin tinggi faktor daya (mendekati 1) artinya semakin banyak daya tampak yang diberikan sumber bisa kita manfaatkan, sebaliknya semakin rendah faktor daya (mendekati 0) maka semakin sedikit daya yang bisa kita manfaatkan dari sejumlah daya tampak yang sama.

Rasio antara P dengan S tidak lain adalah nilai cosinus dari sudut Φ . Apabila kita berusaha untuk membuat sudut Φ semakin kecil maka S akan semakin mendekat ke P artinya besarnya P akan mendekati besarnya S . Pada kasus ekstrim dimana $\Phi=0^\circ$, $\cos \Phi=1$, $S = P$ artinya semua daya tampak yang diberikan sumber dapat kita manfaatkan sebagai daya aktif, sebaliknya $\Phi=90^\circ$, $\cos \Phi=0$, $S = Q$ artinya semua daya tampak yang diberikan sumber tidak dapat kita manfaatkan dan menjadi daya reaktif di jaringan saja.

Salah satu cara untuk memperbaiki faktor daya adalah dengan memasang komponen listrik yang dapat menghasilkan daya reaktif dan juga menyerap daya reaktif pada jaringan dimana dia tersambung. Pada jaringan kompensasi kapasitif menggunakan SVC pada jaringan tersebut. SVC adalah yang bersifat induktif dengan segitiga daya seperti ditunjukkan pada Gambar 2.19.



Gambar 2.19 Perbaikan faktor daya

Apabila SVC dipasang maka daya reaktif yang harus disediakan oleh sumber akan berkurang sebesar Q_{koreksi} (yang merupakan daya reaktif berasal dari SVC). Besarnya Q_{koreksi} dapat ditentukan yang harus diberikan, dengan persamaan.

$$Q = P \tan \phi \quad (2.43)$$

$$Q' = P \tan \phi' \quad (2.44)$$

Dimana daya reaktif kapasitif (Q_c) yang harus diberikan adalah

$$\begin{aligned} Q_{\text{koreksi}} &= Q - Q' \\ Q_{\text{koreksi}} &= P (\tan \phi - \tan \phi') \end{aligned} \quad (2.45)$$

2.5 *Static VAR Compensator (SVC)* [8, 9, 13]

Peralatan FACTS jenis *Static Var Compensator* (SVC) adalah salah satu komponen FACTS dengan hubungan paralel, yang fungsi utamanya untuk mengatur tegangan pada bus tertentu dengan cara mengontrol besaran reaktansi ekuivalen. Dari sudut pandang operasional, SVC bekerja seperti reaktans variabel shunt, yang bisa menghasilkan atau menyerap daya reaktif untuk mengatur besarnya tegangan pada titik sambungan ke jaringan AC. Dalam bentuk yang paling sederhana, SVC terdiri dari komponen *fixed capacitor* (FC) yang terhubung paralel dengan *thyristor-controlled reactor* (TCR). Kontrol sudut penyalan thyristor memungkinkan SVC untuk memiliki kecepatan respon yang hampir seketika. Hal ini digunakan secara luas untuk menyalurkan daya reaktif dan menyediakan *support* regulasi tegangan dengan cepat. Selain itu SVC juga dipakai untuk

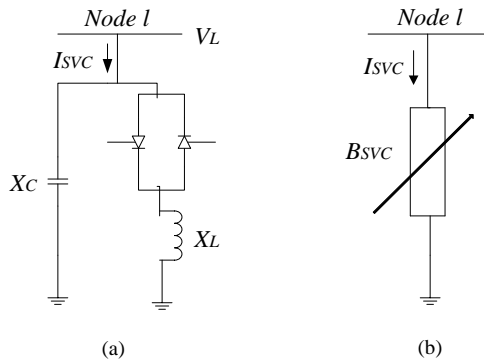
meningkatkan batas stabilitas sistem dan mengurangi osilasi daya. Secara umum ada dua konfigurasi SVC, yaitu:

a). Model firing angle SVC

Pemodelan SVC berupa reaktansi ekuivalen X_{SVC} , yang merupakan dari perubahan sudut penyalan α , yang terdiri dari kombinasi paralel admitansi ekuivalen thyristor-controlled reactor (TCR) dan reaktansi kapasitif tetap, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.20(a).

b). Model *total susceptance* SVC

SVC dilihat sebagai sebuah reaktansi yang dapat diatur melalui perubahan susceptansi B_{SVC} , yang melambangkan nilai susceptansi SVC total yang diperlukan untuk mempertahankan besar tegangan bus pada nilai tertentu, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.20(b).



Gambar 2.20 Konfigurasi SVC [16, 18, 19]

Dengan mengacu pada Gambar 2.20 (b), arus yang dialirkan oleh SVC adalah

$$I_{SVC} = jB_{SVC}V_l \quad (2.46)$$

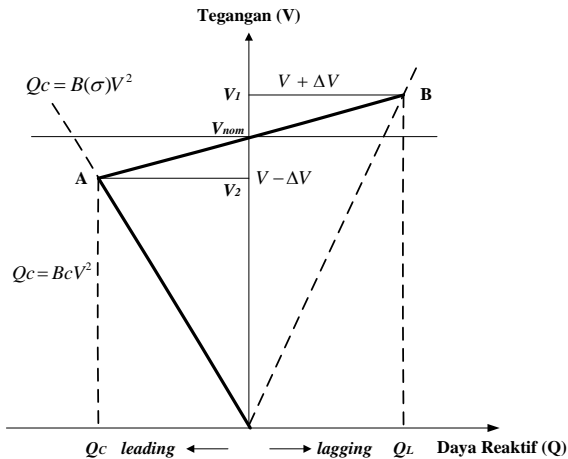
dan daya reaktif yang dibangkitkan oleh SVC, yang juga merupakan daya reaktif yang diinjeksikan pada bus 1 [3], adalah

$$Q_{SVC} = Q_l = -V_l^2 B_{SVC} \quad (2.47)$$

Terdapat tiga area kerja SVC, yaitu:

- 1) Area kerja pertama terdapat di antara V_1 dan V_2 . Di area ini, SVC bersifat kapasitif atau induktif. Daya reaktif yang dihasilkan berubah - ubah sesuai kebutuhan sistem seperti diberikan pada persamaan (2.47).
- 2) Area kerja kedua bila tegangan bus melebihi V_1 . Di area ini SVC memiliki karakteristik induktif.
- 3) Area kerja ketiga bila tegangan kurang dari V_2 . Di area ini SVC hanya berfungsi sebagai fixed capacitor saja.

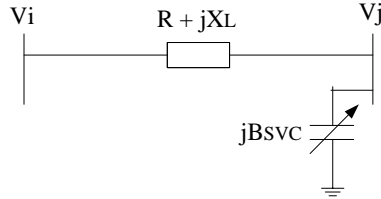
Kurva daya reaktif yang dihasilkan SVC terhadap tegangan bus yang dipasang SVC ditunjukkan pada Gambar 2.21 berikut ini:



Gambar 2.21 Kurva daya reaktif dan tegangan pada SVC [16, 18, 19]

2.5.1 Metode Automatic Control Switching SVC

Pengembangan peralatan SVC pertama kali digunakan untuk kontrol tegangan secara cepat untuk mengatasi beban industri yang besar dan berubah-ubah. SVC memiliki komponen yang sama dengan TCSC [4,13,17]. Prinsip kerja SVC berdasarkan pada nilai tegangan. Saat tegangan sistem rendah, SVC akan menginjeksikan daya reaktif yang dibangkitkan dari kapasitor bank dan begitu pula sebaliknya. Kontrol sudut penyalan thyristor mempengaruhi nilai daya reaktif dari SVC. Representasi permodelan SVC yang terhubung pada saluran i dan j ditunjukkan pada Gambar 2.22.



Gambar 2.22 Representasi SVC

Dari gambar di atas SVC dimodelkan sebagai variabel susceptansi yang dikoneksikan shunt, B_{SVC} akan menyesuaikan secara otomatis untuk mengontrol besar tegangan sesuai yang diharapkan, B_{SVC} ditentukan besarnya berdasarkan sudut penyalan α pada thyristor. Besar ekuivalen susceptansi adalah sebagai berikut:

$$B_{SVC} = B_L(\alpha) + B_C \quad (2.48)$$

Dimana,

$$B_L(\alpha) = -\frac{1}{\omega L} \left[1 - \frac{2\alpha}{\pi} - \frac{\sin(2\alpha)}{\pi} \right], B_C = \omega C \text{ dan } 0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ \quad (2.49)$$

Nilai SVC (B_{SVC}) berada pada range nilai minimum dan maksimum yang diatur oleh sudut penyalan.

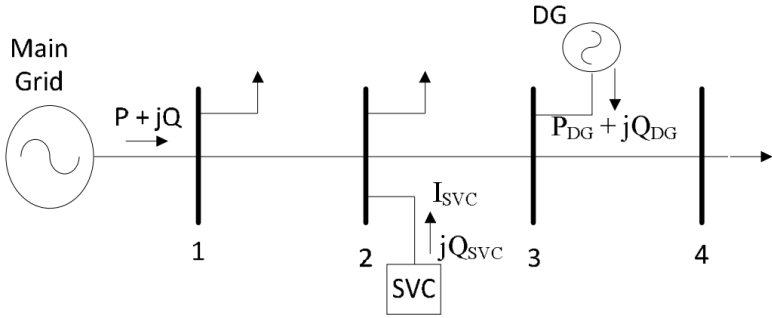
$$B_{SVCmin} \leq B_{SVC} \leq B_{SVCmax}$$

Nilai injeksi Var SVC didapat dari persamaan berikut:

$$Q_{SVC} = -V_j^2 B_{SVC} \quad (2.50)$$

2.5.2 Pengaruh Pemasangan SVC

SVC yang telah dipasang pada jaringan distribusi akan menginjeksi atau mengabsorbsi daya reaktif ke atau dari sistem. Gambar 2.23 berikut merupakan contoh kasus pemasangan SVC pada jaringan distribusi sistem 4 bus.



Gambar 2.23 Diagram satu garis jaringan distribusi 4 bus dengan SVC

Setelah SVC dipasang seperti yang terdapat pada gambar 2.23 di atas, persamaan dapat ditulis menjadi:

$$I_2 = Y_{22}V_2 + \sum_{k=1}^3 Y_{2k}V_k + I_{SVC} \quad ; k \neq 2 \quad (2.51)$$

$$I_2 = Y_{22}V_2 + Y_{21}V_1 + Y_{23}V_3 + I_{SVC} \quad (2.52)$$

I_{SVC} akan bernilai positif bila SVC menginjeksi daya reaktif, sebaliknya akan bernilai negatif bila SVC mengabsorbsi daya reaktif. Dengan mensubstitusi $I_{SVC} = B_{SVC}V_2$ ke dalam Persamaan (2.51), maka I_2 dapat ditulis menjadi:

$$I_2 = Y_{22}V_2 + \sum_{k=1}^3 Y_{2k}V_k + B_{SVC}V_2 \quad ; k \neq 2 \quad (2.53)$$

Maka bentuk umum dari persamaan 2.53 tersebut di mana SVC dipasang pada bus ke- i dapat ditulis menjadi:

$$I_i = Y_{ii}V_i + \sum_{k=1}^n Y_{ik}V_k + B_{SVC}V_i \quad ; k \neq i \quad (2.54)$$

Besar arus pada persamaan (2.54) disubstitusi ke dalam persamaan aliran daya, maka:

$$P_i - jQ_i = V_i^* \left(Y_{ii} V_i + \sum_{k=1}^n Y_{ik} V_k + B_{svc} V_i \right) ; k \neq i \quad (2.55)$$

Sedangkan nilai tegangan dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan (2.56) setelah harga dari persamaan aliran daya [12,14] pada persamaan 2.55 diperoleh, yaitu:

$$V_i = \frac{1}{Y_{ii}} \left[\frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} - \sum_{k=1}^n Y_{ik} V_k \right] ; k \neq i \quad (2.56)$$

2.6 Studi Aliran Daya

Studi aliran daya merupakan analisa penting dalam suatu sistem tenaga listrik, baik untuk perencanaan sistem maupun operasi sistem tenaga listrik. Dalam studi aliran daya sistem tenaga, ada dua hal penting yang perlu diperhatikan yaitu untuk menentukan besar dan sudut fasa tegangan pada setiap bus serta mengetahui aliran daya pada setiap saluran transmisi, dengan diketahuinya tegangan maka daya aktif (P) dan daya reaktif (Q) dapat dihitung. Adapun tujuan analisa aliran daya adalah:

1. Untuk memperoleh kondisi awal bagi studi-studi selanjutnya, yakni studi hubung singkat, studi rugi-rugi transmisi dan studi stabilitas.
2. Untuk mengevaluasi kemampuan semua peralatan yang ada dalam sistem apakah cukup besar untuk menyalurkan daya yang diinginkan.
3. Untuk memeriksa tegangan dan sudut fasa masing-masing bus.

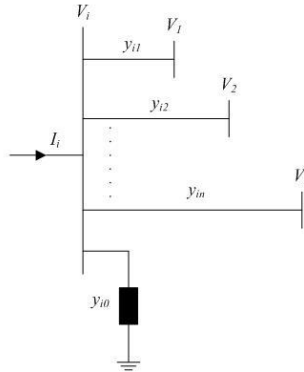
Ada 3 macam bus dalam hal ini setiap bus mempunyai empat besaran dengan dua besaran [10,11] diantaranya diketahui yakni:

- a. Bus referensi (*slack bus*). Adalah bus yang selalu mempunyai besaran skalar ($|V|$) dan sudut fasa (θ) yang tetap dan telah diberikan sebelumnya, pada bus ini berfungsi untuk mencatu rugi-rugi, maka diperluknsuatu bus yang mempunyai daya tak terbatas sehingga dapat mengimbangi rugi-rugi.

- b. Bus generator (bus PV). Pada tipe bus ini, besar tegangan ($|V|$) dan daya aktif (P) telah ditentukan sedangkan daya reaktif dan sudut fasa tegangan didapat dari hasil perhitungan.
- c. Bus beban (bus PQ). Pada tipe bus ini daya aktif (P) dan daya reaktif (Q) diketahui, sedangkan dua lainnya didapat dari hasil perhitungan.

2.6.1 Persamaan Aliran Daya [10,12]

Sistem tenaga listrik tidak hanya terdiri dari dua bus, melainkan terdiri dari beberapa bus yang saling terinterkoneksi satu sama lain. Daya listrik yang diinjeksikan generator pada salah satu bus bukan hanya diserap beban bus tersebut, melainkan dapat diserap beban bus yang lain. Kelebihan daya pada salah satu bus akan dikirim pada bus yang lain yang kekurangan daya. Situasi pada salah satu bus (bus i) pada suatu sistem tenaga diperlihatkan pada gambar 2.24.



Gambar 2.24 Tipikal bus dari sistem tenaga [8]

Dengan menggunakan hukum Kirchof untuk arus:

$$I_i = y_{i0}V_i + y_{i1}(V_i - V_1) + y_{i2}(V_i - V_2) + \dots + y_{in}(V_i - V_n) \quad (2.57)$$

$$= (y_{i0} + y_{i1} + y_{i2} + \dots + y_{in})V_i - y_{i1}V_1 - y_{i2}V_2 - \dots - y_{in}V_n \quad (2.58)$$

Atau

$$I_i = V_i \sum_{j=0}^n y_{ij} - \sum_{j=1}^n y_{ij} V_j, \quad j \neq i \quad (2.59)$$

Daya aktif dan daya reaktif pada bus i adalah:

$$P_i + jQ_i = V_i I_i^* \quad (2.60)$$

Atau

$$I_i = (P_i - jQ_i)/V_i^* \quad (2.61)$$

Substitusi untuk I_i pada persamaan berikut, hasilnya :

$$\frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} = V_i \sum_{j=0}^n y_{ij} - \sum_{j=1}^n y_{ij} V_j \quad , j \neq 1 \quad (2.62)$$

Teknik iterasi dari hubungan di atas formulasi perhitungan dari aliran daya dalam sistem tenaga harus diselesaikan .

2.6.2 Aliran Daya dan Rugi-rugi Daya pada Saluran [10,12]

Pada pembahasan sebelumnya dijelaskan penentuan dari bus tegangan, maka langkah berikutnya adalah perhitungan aliran daya dan rugi-rugi daya pada saluran. Saluran dihubungkan ke bus i dan bus j seperti gambar 2.25 di bawah, arus pada saluran Iij dihitung dari bus yang ditandai positif. Besar arus Iij dapat dihitung dengan persamaan:

$$I_{ij} = I_l + I_{i0} = y_{ij}(V_i - V_j) + y_{i0}V_i \quad (2.63)$$

Untuk arus Iji yang diukur pada bus j dan ditandai positif dalam arah i – j dapat ditunjukkan sebagai berikut:

$$I_{ji} = -I_l + I_{j0} = y_{ij}(V_j - V_i) + y_{j0}V_j \quad (2.64)$$

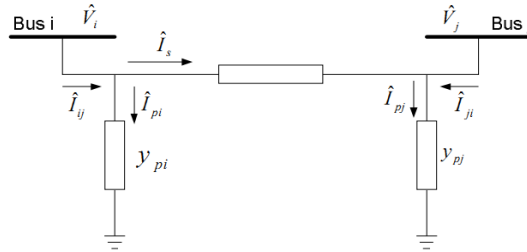
Untuk perhitungan daya kompleks Sij dari bus i ke bus j dan sebaliknya

$$S_{ij} = V_i I_{ij}^* \quad (2.65)$$

$$S_{ji} = V_j I_{ji}^* \quad (2.66)$$

Maka rugi-rugi total saluran i – j merupakan penjumlahan aljabar dari persamaan 2.65 dan 2.66.

$$S_{Lij} = S_{ij} + S_{ji} \quad (2.67)$$



Gambar 2.25 Model saluran transmisi untuk perhitungan aliran daya dan rugi saluran

2.7 Aliran Daya Metode Newton Rhapsion [12,14]

Pada Aliran daya (*Load Flow*) merupakan langkah awal dalam penentuan parameter-parameter awal yang kemudian akan dilakukan iterasi pada langkah selanjutnya. Setelah dilakukan pembacaan data maka dilakukan perhitungan untuk mengetahui aliran daya dari sistem. *Load flow* dapat dihitung dari matrik admitansi sistem. Secara umum, persamaan load flow dapat ditulis sebagai berikut:

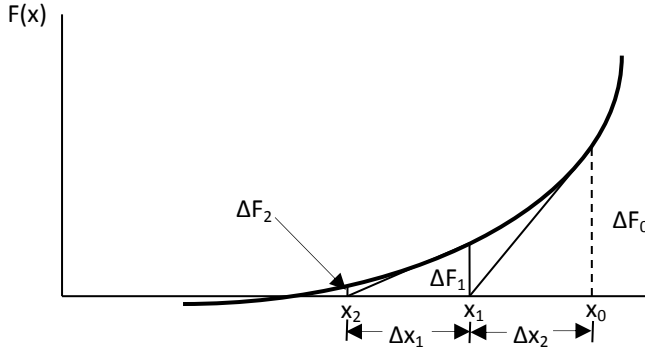
$$P_i - jQ_i = V_i^* \sum_{j=1}^n V_j Y_{ij} \quad (2.68)$$

Metode Newton Raphson merupakan sebuah metode yang dikembangkan dari Deret Taylor mendapatkan turunan persamaan matematika dalam penentuan matrik Jacobian sebagai dasar perhitungan iterasinya.

Untuk persamaan Deret Taylor dapat ditulis seperti persamaan dibawah ini:

$$\begin{aligned} f(x) = & f(x_0) + \frac{1}{1!} \frac{df(x_0)}{dx} (x - x_0) + \frac{1}{2!} \frac{d^2f(x_0)}{dx^2} (x - x_0)^2 \\ & + \dots + \frac{1}{n!} \frac{d^nf(x_0)}{dx^n} (x - x_0)^n = 0 \end{aligned} \quad (2.69)$$

Proses iterasi yang dilakukan sampai memperoleh solusi akhir $f(x) = 0$ atau mendekati nilai ketelitian yang ditentukan, hal ini sebagaimana diilustrasikan pada gambar 2.26.



Gambar 2.26 Ilustrasi metode Newton Raphson.

Dalam perhitungan daya aktif (P) dan daya reaktif (Q) dapat diturunkan dari persamaan:

$$P = VI \cos \theta \quad (2.70)$$

Dimana

$$I = V \cdot Y \quad (2.71)$$

dengan menstutbitusi persamaan (2.71) kedalam peersamaan (2.70) maka akan didapat didapat persamaan (2.72):

$$P = V_1 V_2 Y \cos(\delta_1 - \delta_2 - \theta) \quad (2.72)$$

Jika persamaan tersebut diaplikasikan pada analisa banyak mesin/ multimesin, maka persamaan yang didapat:

$$P_1 = Y_{11} V_1 V_1 \cos(\theta_{11} + \delta_1 - \delta_1) + Y_{12} V_1 V_2 \cos(\theta_{12} + \delta_1 - \delta_2) + \dots + Y_{1n} V_1 V_n \cos(\theta_{1n} + \delta_1 + \delta_n) \quad (2.73)$$

$$P_1 = V_1^2 Y_{11} \cos(\theta_{11}) + Y_{12} V_1 V_2 \cos(\theta_{12} + \delta_1 - \delta_2) + \dots + Y_{1n} V_1 V_n \cos(\theta_{1n} + \delta_1 + \delta_n) \quad (2.74)$$

dengan menstutitusikan persamaan (2.75) kedalam persamaan (2.74)

$$Y = G + jB \quad (2.75)$$

$$G = Y \cos \theta ; B = Y \sin \theta \quad (2.76)$$

maka didapat persamaan,

$$P_1 = V_1^2 G_{11} + Y_{12} V_1 V_2 \cos(\theta_{12} + \delta_1 - \delta_2) + \dots + Y_{1n} V_1 V_n \cos(\theta_{1n} + \delta_1 + \delta_n) \quad (2.77)$$

begitu pula untuk menghitung daya pada bus yang lain, dapat dituliskan dengan persamaan sebagai berikut:

$$P_i = V_i^2 G_{ii} + \sum_{i,i \neq j}^n Y_{ij} V_i V_j \cos(\theta_{ij} + \delta_i - \delta_j) \quad (2.78)$$

Pada persamaan Q juga dapat diturunkan dari persaman

$$Q = VI \sin \theta \quad (2.79)$$

Sehingga,

$$Q = V_1 V_2 Y \sin(\delta_1 - \delta_2 - \theta) \quad (2.80)$$

jika persamaan tersebut diaplikasikan pada analisa banyak mesin/ multimesin, maka persamaan yang didapat:

$$Q_1 = Y_{11} V_1 V_1 \sin(\theta_{11} + \delta_1 - \delta_1) + Y_{12} V_1 V_2 \sin(\theta_{12} + \delta_1 - \delta_2) + \dots + Y_{1n} V_1 V_n \sin(\theta_{1n} + \delta_1 - \delta_n) \quad (2.81)$$

$$Q_1 = V_1^2 Y_{11} \sin(\theta_1) + Y_{12} V_1 V_2 \sin(\theta_{12} + \delta_1 - \delta_2) + \dots + Y_{1n} V_1 V_n \sin(\theta_{1n} + \delta_1 + \delta_n) \quad (2.82)$$

Dengan menstutitusikan persamaan (2.75) kedalam persamaan (2.82) maka didapat persamaan,

$$Q_1 = V_1^2 B_{11} + Y_{12} V_1 V_2 \sin(\theta_{12} + \delta_1 - \delta_2) + \dots + \quad (2.83)$$

$$Y_{1n} V_1 V_n \sin(\theta_{1n} + \delta_1 + \delta_n)$$

Jika pada banyak mesin/ multimesin, maka persamaan yang didapat:

$$Q_i = V_i^2 B_{ii} - \sum_{i,i \neq j}^n \sum_j^n Y_{ij} V_i V_j \sin(\theta_{ij} + \delta_i - \delta_j) \quad (2.84)$$

dimana:

- P_i : daya aktif terbangkit pada bus ke- i
- Q_i : daya reaktif terbangkit pada bus ke- i
- Y_{ij}, θ_{ij} : magnitude dan sudut fasa elemen matrik admitansi Y
- V_i, δ_i : magnitude tegangan dan sudut fasa pada bus ke- i
- V_j, δ_j : magnitude tegangan dan sudut fasa pada bus ke- j

Kemudian, setelah daya dan tegangan tiap bus diketahui, maka akan ditentukan matrik Jacobian untuk iterasi selanjutnya. Matrik Jacobian sendiri terdiri dari komponen H , komponen N , komponen J , dan komponen L . Sehingga, untuk mencari aliran daya setiap bus dapat ditulis persamaan dari load sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} H & N \\ J & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \frac{\Delta|V|}{|V|} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (2.85)$$

Selanjutnya dari perkalian matrik Jacobian diatas, akan didapat nilai dari $\Delta\theta_i$ dan $\Delta|V_i|$ yang digunakan sebagai *update* sudut dan magnitude tegangan tiap bus.

$$\theta_i^{(k+1)} = \theta_i^{(k)} + \Delta\theta_i \quad (2.86)$$

$$|V_i|^{(k+1)} = |V_i|^{(k)} + \Delta|V_i| \quad (2.87)$$

dimana :

- $(k+1)$: jumlah iterasi newton raphson
- $\Delta\theta_i$: Perubuaaha sudut tegangan pada bus ke- i
- $\Delta|V_i|$: Perubahan magnitude tegangan pada bus ke- i

Setelah itu, selisih daya aktif dan reaktif tiap bus yang baru dengan yang lama akan dibandingkan dengan ketelitian yang telah ditentukan. Apabila nilai ketelitian telah tercapai, maka proses iterasi selesai, namun sebaliknya, jika nilai ketelitian belum tercapai maka iterasi akan dilanjutkan dan sebaliknya.

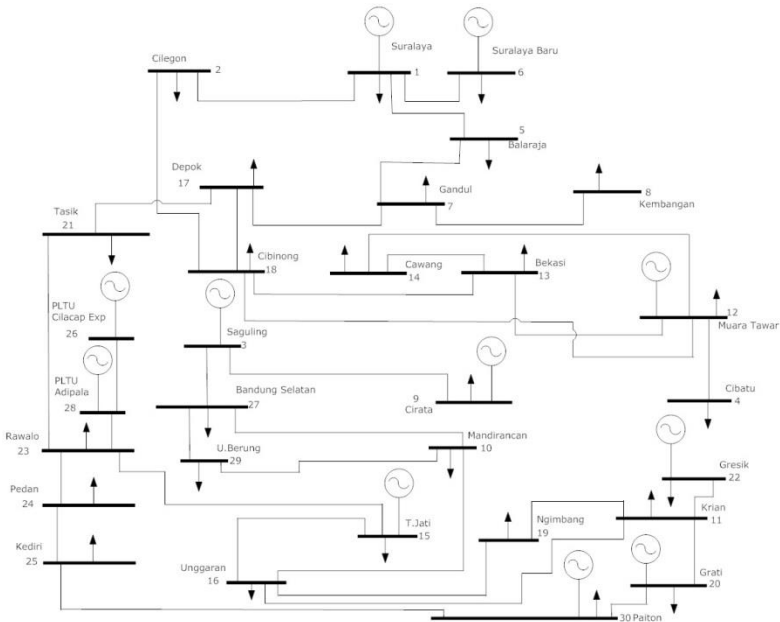
Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 3

PEMODELAN SISTEM

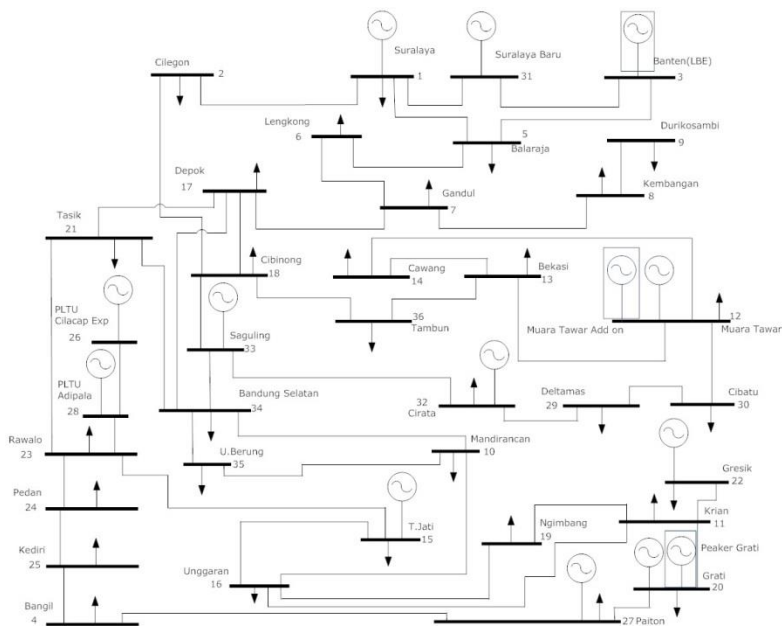
3.1 Data Kelistrikan Jamali 500kV

Pemodelan sistem diperlukan pada suatu sistem Interkoneksi seperti halnya sistem kelistrikan Jawa-Madura-Bali (Jamali) 500 kV yang digunakan untuk analisa sistem stabilitas tegangan dapat digambarkan dengan single line diagram dapat ditunjukkan pada gambar 3.1 di bawah.



Gambar 3.1 Sistem interkoneksi 500 kV jamali

Gambar diatas merupakan sistem kelistrikan Jawa-Madura-Bali (Jamali) 500 kV yang masih eksisting tahun 2017 sebelum ada penambahan pembangkit 1575 MW. Lalu, pada gambar 3.2 merupakan pengembangan sistem kelistrikan Jawa-Madura-Bali (Jamali) 500 kV tahun 2017 setelah ada penambahan pembangkit 1575 MW.



Gambar 3.2 Sistem interkoneksi 500 kV jamali setelah penambahan pembangkit 1575 MW

Data saluran dan data bus yang digunakan sebagai masukan untuk proses simulasi seperti yang ditunjukkan tabel 3.1. Dimana impedansi base ($Z_B = 2500 \Omega$) dan admitansi base ($Y_B = 0,0004 \text{ U}$).

Tabel 3.1 Data saluran sistem interkoneksi 500 kV Jamali tahun 2017

No.	Dari Bus	Nama Bus	Ke Bus	Nama Bus	R (pu)	X (pu)	B (pu)
1	1	SURALAYA	2	CILEGON	0.000065	0.000724	0.261165
2	1	SURALAYA	5	BALARAJA	0.000376	0.003617	1.296796
3	2	CILEGON	18	CIBINONG	0.001305	0.014644	1.326168
4	3	BANTEN	5	BALARAJA	0.000391	0.004375	0.580019
5	4	BANGIL	27	PAITON	0.000515	0.005773	2.087333
6	6	LENGKONG	7	GANDUL	0.000114	0.001098	0.393134

Tabel 3.1 Data saluran sistem interkoneksi 500 kV Jamali (lanjutan)

No.	Dari Bus	Nama Bus	Ke Bus	Nama Bus	R (pu)	X (pu)	B (pu)
7	6	LENGKONG	5	BALARAJA	0.000205	0.001970	0.705682
8	7	GANDUL	8	KEMBANGAN	0.000151	0.001690	0.609427
9	7	GANDUL	17	DEPOK	0.000044	0.000422	0.151201
10	9	DURIKOSAMBI	8	KEMBANGAN	0.000024	0.000275	0.132750
11	10	MANDIRANCAN	16	UNGGARAN	0.001282	0.012433	4.514899
12	11	KRIAN	16	UNGGARAN	0.003047	0.029667	2.710785
13	11	KRIAN	20	GRATI	0.000462	0.005181	1.872153
14	11	KRIAN	22	GRESIK	0.000135	0.001295	0.463703
15	11	KRIAN	19	NGIMBANG	0.000557	0.005357	0.479911
16	12	M. TAWAR	13	BEKASI	0.000247	0.002376	0.212697
17	12	M. TAWAR	30	CIBATU	0.000282	0.002712	0.971925
18	12	M.TAWAR	14	CAWANG	0.000479	0.004604	0.412337
19	14	CAWANG	13	BEKASI	0.000197	0.001890	0.169202
20	15	T.JATI	16	UNGGARAN	0.000672	0.007545	2.733735
21	15	T.JATI	2	PEDAN	0.001785	0.020095	1.827665
22	16	UNGGARAN	19	NGIMBANG	0.002355	0.023011	4.221737
23	17	DEPOK	18	CIBINONG	0.000082	0.000788	0.282245
24	17	DEPOK	21	TASIK	0.002688	0.030515	2.810010
25	17	DEPOK	34	BANDUNG SEL	0.001523	0.017110	1.552190
26	18	CIBINONG	33	SAGULING	0.000403	0.004510	1.628696
27	18	CIBINONG	36	TAMBUN	0.000152	0.001464	0.524194
28	20	GRATI	27	PAITON	0.000440	0.004929	1.780840
29	21	TASIK	23	RAWALO	0.000683	0.007667	2.778507
30	23	RAWALO	24	PEDAN	0.000830	0.009330	3.389878
31	24	PEDAN	25	KEDIRI	0.001000	0.011279	4.113567
32	25	KEDIRI	4	BANGIL	0.000550	0.006169	2.231523
33	26	PLTU CILACAP	28	PLTU ADIPALA	0.000080	0.000915	0.442251
34	28	PLTU ADIPALA	23	RAWALO	0.000114	0.001310	0.632819
35	29	DELTAMAS	30	CIBATU	0.000070	0.000676	0.241923
36	29	DELTAMAS	32	CIRATA	0.000246	0.002364	0.846861
37	31	SURALAYA BARU	1	SURALAYA	0.000008	0.000092	0.011062
38	31	SURALAYA BARU	3	BANTEN	0.000211	0.002026	0.725849
39	33	SAGULING	32	CIRATA	0.000148	0.001419	0.508063
40	33	SAGULING	34	BANDUNG SEL	0.000189	0.002111	0.761314
41	34	BANDUNG SEL	35	U.BERUNG	0.000674	0.006482	0.580790

Tabel 3.1 Data saluran sistem interkoneksi 500 kV Jamali (lanjutan)

No.	Dari Bus	Nama Bus	Ke Bus	Nama Bus	R (pu)	X (pu)	B (pu)
42	34	BANDUNG SEL	10	MANDIRANCAN	0.001392	0.013409	1.205178
43	34	BANDUNG SEL	21	TASIK	0.001263	0.014177	1.283460
44	35	U. BERUNG	10	MANDIRANCAN	0.000362	0.003477	1.246315
45	36	TAMBUN	13	BEKASI	0.000140	0.001345	0.481848

Data pembangkitan dan data bus yang digunakan sebagai masukan untuk proses simulasi seperti yang ditunjukkan tabel 3.2. Dimana MVA base (MVA_B) adalah sebesar 100 MVA dan tegangan base (V_B) adalah sebesar 500 kV.

Tabel 3.2 Data pembangkitan sistem interkoneksi 500 kV Jamali

No Bus	Bus Code	Nama Bus	Load		Generator		Qmax	Qmin	Qinj
			MW	MVAR	MW	MVAR	MVAR	MVAR	MVAR
1	1	SURALAYA	27.3	13.19	2181.84	938.48	1870.34	-796.24	0
2	0	CILEGON	127.9	61.82	0	0	0	0	0
3	2	BANTEN	0	0	575.00	318.75	318.75	-167.83	0
4	0	BANGIL	371.1	179.37	0	0	0	0	0
5	0	BALARAJA	1245.4	601.94	0	0	0	0	0
6	0	LENGKONG	351.9	170.9	0	0	0	0	0
7	0	GANDUL	679.3	328.33	0	0	0	0	0
8	0	KEMBANGAN	599.3	289.66	0	0	0	0	0
9	0	DURIKOSAMBI	496.7	240.07	0	0	0	0	0
10	0	MANDIRANCAN	343.6	166.7	0	0	0	0	0
11	0	KRIAN	960.2	464.1	0	0	0	0	0
12	2	M.TAWAR	221.4	107.1	1895.2	956.5	1306.67	-615,33	0
13	0	BEKASI	567.3	274.2	0	0	0	0	0
14	0	CAWANG	708.5	342.44	0	0	0	0	0
15	2	T.JATI	718.9	347.47	2400	182.38	1306.67	-615.3	0
16	0	UNGGARAN	567.1	274.1	0	0	0	0	0
17	0	DEPOK	305.1	147.46	0	0	0	0	0
18	0	CIBINONG	361.8	174.87	0	0	0	0	0

Tabel 3.2 Data pembangkitan sistem interkoneksi 500 kV Jamali
(lanjutan)

No Bus	Bus Code	Nama Bus	Load		Generator		Qmax	Qmin	Qinj
			MW	MVAR	MW	MVAR	MVAR	MVAR	MVAR
19	0	NGIMBANG	197.3	95.36	0	0	0	0	0
20	2	GRATI	321.6	155.4	600.2	162.3	317.59	-136.71	0
21	0	TASIK	350.4	169.36	0	0	0	0	0
22	2	GRESIK	182.83	88.11	594.5	324.76	359.51	-192.53	0
23	0	RAWALO	400.8	193.72	0	0	0	0	0
24	0	PEDAN	570.6	275.79	0	0	0	0	0
25	0	KEDIRI	394.5	190.68	0	0	0	0	0
26	2	PLTU CILACAP	0	0	575	38.46	283.33	-220.41	0
27	2	PAITON	665.1	321.46	3950	126.24	2426	-1271.5	0
28	2	PLTU ADIPALA	0	0	600	56.54	283.33	-220.41	0
29	0	DELTAMAS	315.9	152.68	0	0	0	0	0
30	0	CIBATU	849.7	410.69	0	0	0	0	0
31	2	SURALAYA BARU	65.6	31.71	575	146.86	318.75	-167.83	0
32	2	CIRATA	303.20	146.55	542.4	347.35	347.35	-320	0
33	2	SAGULING	0	0	305.1	176.63	460.94	-176.63	0
34	0	BANDUNG SEL	316.9	153.17	0	0	0	0	0
35	0	U.BERUNG	471.6	227.94	0	0	0	0	0
36	0	TAMBUN	515.10	248.97	0	0	0	0	0

3.2 PowerWorld 18

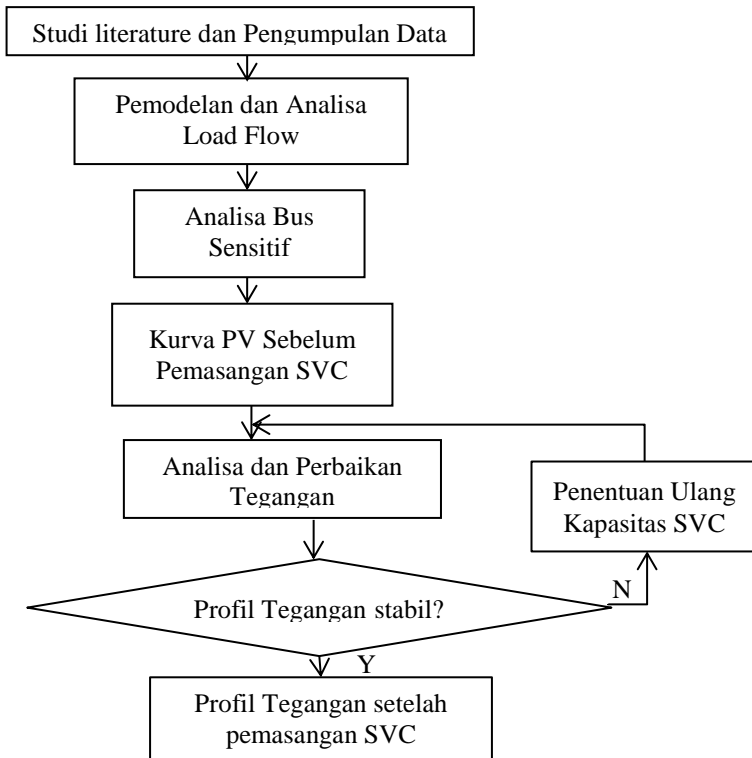
Software atau perangkat lunak yang digunakan untuk melakukan simulasi ketenagalistrikan banyak sekali, salah satunya adalah PowerWorld Simulator. Software ini biasa digunakan untuk analisa sistem tenaga listrik seperti kestabilan tegangan, transient, dan lain-lain, karena didesain dan dikembangkan secara berkesinambungan sehingga penggunaannya menjadi sangat *user-friendly* dan interaktif. Dalam kapabilitasnya sebagai perangkat lunak untuk bidang keilmuan teknik tenaga listrik, simulator ini telah teruji memiliki kemampuan yang setara dalam memecahkan permasalahan-permasalahan di area sistem ketenagalistrikan dengan perangkat lunak sejenis, namun mempunyai kelebihan pada tampilannya yang tersaji secara interaktif melalui tampilan visualisasi grafis.

Pada PowerWorld Simulator, pemodelan sistem tenaga listrik dapat dilakukan dengan menggunakan fungsi graphical case editor. Jaringan transmisi, misalnya dapat dihubungkan atau dikeluarkan dari sistem, jaringan transmisi atau pembangkit baru dapat ditambahkan, demikian pula untuk aktifitas penyaluran daya (power dispatch). Dengan penggunaan animasi dan grafis yang maksimal, pengguna dapat memperoleh pemahaman yang baik tentang karakteristik sistem, permasalahan, batasan-batasan, maupun bagaimana cara memperbaiki kondisi atau meningkatkan keandalan sistem secara lebih mudah. Untuk aplikasi dasar, PowerWorld Simulator 18 dapat melakukan analisis integrated economic dispatch, analisis transaksi ekonomi per area, komputasi Power Transfer Distribution Factor (PTDF), analisis hubungan singkat, dan analisis kontingensi. Semua aplikasi ini dapat diakses dengan mudah melalui fasilitas antar muka yang tervisualisasi.

Sebagai tambahan, beberapa Add-on telah tersedia yang memungkinkan pengguna dapat melakukan analisis khusus, diantaranya *Voltage Adequacy and Stability Tool* (PVQV). Fitur Add-on ini memungkinkan pengguna untuk menganalisis stabilitas tegangan sistem melalui simulasi PV/QV. Selanjutnya, pengguna dapat memperoleh tampilan grafik dari parameter-parameter sistem.

3.3 Metodologi Simulasi

Pada Kestabilan tegangan terdapat dua metodologi simulasi yaitu Kurva PV dan QV, namun disini yang digunakan adalah Kurva PV, karena sangat berguna untuk analisis kestabilan tegangan. Maksimum transfer daya terjadi ketika magnitude dari impedansi beban sama dengan magnitude dari impedansi sumber. Kurva tersebut menunjukkan bahwa P yaitu beban total yang dibutuhkan pada suatu area sedangkan titik puncak menyatakan kondisi operasi stabil dan jika melebihi titik kritis menyatakan ketidakstabilan kondisi operasi sistem tenaga listrik. Berdasarkan tabel 3.1 dan 3.2 dapat dihasilkan flowchart yang menunjukkan metodologi simulasi dari percobaan.



Gambar 3.3 Diagram alir metodologi pelaksanaan studi

Berdasarkan gambar 3.3 di atas maka metodologi simulasi yang digunakan dapat dijelaskan sebagai berikut:

1. Studi Literatur dan Pengumpulan Data

Studi literatur perlu dilakukan untuk menunjang penguasaan tentang pengumpulan pustaka untuk dipelajari dalam pengerjaan dan penelitian Tugas Akhir (TA), dalam pencarian pustaka digunakan pengumpulan data, dengan menggunakan data-data yang dari sistem kelistrikan Jamali 500 kV. Data-data meliputi data pembangkitan, data beban, dan data saluran dari masing-

masing bus. Kemudian dilakukan studi aliran daya (*load flow analysis*) dengan PowerWorld 18 simulator saat keadaan awal.

2. Analisis load flow

Analisa ini dilakukan menggunakan software Power World. Data-data yang telah didapatkan dimasukkan ke dalam program Power World load-flow. Dari hasil running program tersebut didapatkan bus yang mengalami drop tegangan yang cukup tinggi, jika dilakukan penambahan beban P dan Q.

3. Sensitivity index

Pada saat simulasi aliran load flow maka akan didapatkn bus tegangan dengan drop tegangan yang paling besar, namun belum tentu itu yang paling *sensitive* sehingga dilakukan *sensitivity index* yang ada pada tools di PowerWorld18, Maka akan diketahui bus yang memiliki sensitifitas paling tinggi.

4. Plot kurva P-V sebelum pemasangan SVC

Plot kurva PV pada saat sebelum pemasangan SVC pada bus sensitif.

5. Plot kurva P-V setelah pemasangan SVC

Pemasangan SVC pada bus sensitif untuk perbaikan tegangan pada bus sensitif yang mengalami drop tegangan.

6. Profil Tegangan setelah pemasangan SVC

Plot kurva PV kembali untuk menunjukkan keadaan tegangan setelah pemasangan SVC pada bus sensitif. Profil tegangan pada bus yang mengalami drop tegangan akan diperbaiki, sehingga pada bus tersebut drop tegangan yang terjadi tidak terlalu besar.

BAB 4

SIMULASI DAN ANALISIS

4.1 Data Simulasi

Dalam bab 4 ini akan dibahas tentang simulasi dan analisis untuk membuktikan kecocokan metode dan pemodelan yang telah dirancang. Simulasi dan analisis yang dilakukan pada sistem kelistrikan transmisi Jawa-Madura-Bali 500kV pada tahun 2017 bertujuan untuk mengetahui bus yang mengalami drop tegangan yang mempengaruhi stabilitas sistem kelistrikan Jamali 500kV khususnya stabilitas tegangan. Data untuk simulasi yang diperlukan adalah data sistem tenaga listrik Jamali 500 kV. Pemodelan sistem Jamali adalah bentuk *single line diagram* sistem tenaga listrik Jamali 500 kV pada tahun 2017 dengan menggunakan software PowerWorld 18. Data parameter yang digunakan meliputi data saluran (*line*), data pembangkit (*generation*), dan data beban (*load*) pada aliran daya 500 kV tahun 2017 pada saat beban puncak (*peak load*) pukul 19.00 WIB dengan total beban 14573.4 MW.

4.2 Sistem Pembangkit Listrik Jawa-Madura-Bali (Jamali) 500kV

PT.PLN (Persero) Pusat Pengatur Beban Jawa Bali (PLN P2B JB) merupakan tempat untuk mengelola sisi tegangan ekstra tinggi dan tegangan tinggi pada Operasi sistem tenaga listrik Jamali Jamali 500 kV yang terhubung satu sama lain melalui transmisi tenaga listrik 500 kV, 150 kV dan 70 kV. Single line diagram sistem tenaga listrik Jamali pada tahun 2017 dapat dilihat pada bab 3.

Sistem yang komplek pada sistem jamali 500kV memerlukan interkoneksi antar sistem agar memungkinkan adanya transfer antar area, sehingga kekurangan daya di suatu area akan dapat dibantu area lain melalui jaringan yang terinterkoneksi. Besarnya sistem interkoneksi ini diukur dari besarnya kapasitas pasokan dalam hal ini pembangkit, serta tingkat kebutuhan tenaga listrik. Daya yang disalurkan berasal dari PLTA, PLTU, PLTGU, dan lain-lain.

4.3 Klasifikasi Bus pada Sistem Tenaga Listrik Jamali 500kV

Pada tugas akhir ini bus yang digunakan merupakan sistem tenaga listrik Jamali 500 kV yang dapat dilihat pada single line diagram. Bus yang digunakan dapat diklasifikasikan sebagai berikut:

1. Slack bus (1 bus) yaitu bus Suralaya yang merupakan pembangkit listrik tenaga uap, pada slack bus magnitude tegangan dan sudut phase ditetapkan.
2. Generator bus (11 bus) yaitu Cirata, Saguling, Banten, PLTU Cipala exp, PLTU Adipala, Suralaya Baru, Tanjung Jati, Muara Tawar, Grati, Gresik, dan Paiton.
3. Load bus (24 bus) yaitu bus Cilegon, Lengkong, Gandul, Kembangan, Durikosambi, Bekasi, Cawang, Depok, Cibinong, Tambun, Tasik, Pedan, Kediri, Rawalo, Bangil, Deltamas, Cibat, Bandung Selatan, Ujung Berung, Mandirancan, Ungaran, Ngimbang, dan Krian

Untuk perencanaan single line diagram MVA base yang digunakan adalah 100 MVA dan KV base yang digunakan adalah 500 KV sebagai nilai base yang digunakan untuk sistem kelistrikan Jamali 500 kV pada tahun 2017.

4.4 Simulasi dan Analisis pada Sistem Jaringan

Simulasi untuk sistem tenaga listrik yang digunakan pada tugas akhir adalah dengan menggunakan PowerWorld 18. Metode Newton Raphson digunakan untuk perhitungan aliran daya sistem kelistrikan yang disimulasikan untuk sebelum penambahan pembangkit dan setelah penambahan pembangkit 1575 MW. Hasil running program load flow untuk tegangan dapat dilihat pada tabel 4.1.

Tabel 4.1 Hasil simulasi load flow tegangan sebelum penambahan pembangkit 1575 MW

No Bus	Bus Code	V (pu)	Θ	Load		Generator	
				MW	MVAR	MW	MVAR
1	1	1	0	27.3	13.19	3161.7	1049.8
2	0	0.99739	-0.34	127.9	61.82	0	0
3	2	0.99001	-1.15	0	0	0	0
4	0	0.99421	21.55	371.1	179.37	0	0
5	0	0.96783	-3.67	1245.4	601.94	0	0
6	0	0.95447	-5.48	151.9	170.09	0	0
7	0	0.94786	-6.4	379.3	328.33	0	0
8	0	0.93702	-7.55	599.3	289.66	0	0

Tabel 4.1 Hasil simulasi load flow tegangan sebelum penambahan pembangkit 1575 MW (lanjutan)

No Bus	Bus Code	V (pu)	Θ	Load		Generator	
				MW	MVAR	MW	MVAR
9	0	0.93621	-7.63	496.7	240.07	0	0
10	0	0.96339	-1.17	343.6	166.7	0	0
11	0	0.99666	17.62	960.2	464.1	0	0
12	2	0.95081	-7.15	221.4	107.01	1270.2	706.5
13	0	0.94213	-7.77	567.3	274.2	0	0
14	0	0.93902	-8.17	708.5	342.44	0	0
15	2	1	15.85	718.9	347.47	2400	132.12
16	0	0.99374	10.23	567.1	274.1	0	0
17	0	0.94895	-6.38	305.1	147.46	0	0
18	0	0.94956	-6.49	361.8	174.87	0	0
19	0	0.99995	15.7	197.3	95.36	0	0
20	2	1	22.4	321.6	155.44	300.2	172.64
21	0	0.97897	1.36	350.4	169.36	0	0
22	2	1	17.91	182.3	88.11	594.5	280.84
23	0	0.99726	7.76	400.8	193.72	0	0
24	0	0.99985	11.36	570.6	275.79	0	0
25	0	0.99601	17	394.5	190.68	0	0
26	2	1.001	8.94	0	0	575	38.46
27	2	1	27.04	665.1	321.46	3950	80.76
28	2	1	8.64	0	0	600	4.37
29	0	0.94745	-7.27	315.9	152.68	0	0
30	0	0.94557	-7.52	849.7	410.69	0	0
31	2	0.9999	-0.03	65.6	31.71	575	318.75
32	2	0.95776	-5.92	303.2	146.55	542.4	347.35
33	2	0.9599	-5.31	0	0	305.1	176.63
34	0	0.96061	-4.23	316.9	153.17	0	0
35	0	0.95748	-2.88	471.6	227.94	0	0

Tabel 4.1 Hasil simulasi load flow tegangan sebelum penambahan pembangkit 1575 MW (lanjutan)

No Bus	Bus Code	V (pu)	Θ	Load		Generator	
				MW	MVAR	MW	MVAR
36	0	0.94371	-7.38	515.1	248.97	0	0

Pada tabel 4.1 dapat dilihat hasil tegangan pada setiap bus dimana sebelum ada penambahan pembangkit 1575 MW yang tersebar pada pembangkit Banten 625 MW, Muara tawar *add on* 650 MW, dan Peaker Grati 300 MW.

Tabel 4.2 Hasil simulasi load flow tegangan setelah penambahan pembangkit 1575 MW

No Bus	Bus Code	V (pu)	Θ	Load		Generator	
				MW	MVAR	MW	MVAR
1	1	1	0	27.3	13.19	2181.93	934.54
2	0	0.99764	-0.27	127.9	61.82	0	0
3	2	0.99590	-0.52	0	0	575	318.75
4	0	0.99173	27.01	371.1	179.37	0	0
5	0	0.96932	-3.1	1245.4	601.94	0	0
6	0	0.95432	-4.61	351.9	170.09	0	0
7	0	0.94801	-5.24	679.3	328.33	0	0
8	0	0.93717	-6.39	599.3	289.66	0	0
9	0	0.93636	-6.47	496.7	240.7	0	0
10	0	0.96161	1.83	343.6	166.7	0	0
11	0	0.99609	23.35	960.2	464.1	0	0
12	2	0.96291	-4.21	221.4	107.01	1895.2	956.5
13	0	0.95077	-5.32	567.3	274.2	0	0
14	0	0.9487	-5.57	708.5	342.44	0	0
15	2	1	20.08	718.9	347.47	2400	182.38
16	0	0.99091	14.49	567.1	274.1	0	0
17	0	0.94998	-5.03	305.1	147.46	0	0

Tabel 4.2 Hasil simulasi load flow tegangan setelah penambahan pembangkit 1575 MW (lanjutan)

No Bus	Bus Code	V (pu)	Θ	Load		Generator	
				MW	MVAR	MW	MVAR
18	0	0.95239	-4.87	361.8	174.87	0	0
19	0	0.99838	21.15	197.3	95.36	0	0
20	2	1	28.65	321.6	155.44	600.2	162.3
21	0	0.97776	4.2	350.4	169.36	0	0
22	2	1	23.63	182.3	88.11	594.5	324.76
23	0	0.99658	11.19	400.8	193.72	0	0
24	0	0.99722	15.5	570.6	275.79	0	0
25	0	0.99241	21.98	394.5	190.68	0	0
26	2	1.001	12.36	0	0	575	38.46
27	2	1	32.93	665.1	321.46	3950	126.22
28	2	1	12.06	0	0	600	56.54
29	0	0.95573	-4.62	315.9	152.68	0	0
30	0	0.95463	-4.81	849.7	410.69	575	146.86
31	2	1	0	65.6	31.71	542.4	347.35
32	2	0.96313	-3.5	303.2	146.55	305.1	176.63
33	2	0.96347	-3.02	0	0	0	0
34	0	0.96207	-1.8	316.9	153.17	0	0
35	0	0.9567	-0.08	471.6	227.94	0	0
36	0	0.94963	-5.32	515.1	248.97	0	0

Pada tabel 4.2 dapat dilihat hasil tegangan pada setiap bus dimana setelah ada penambahan pembangkit 1575 MW yang tersebar pada pembangkit Banten 625 MW, Muara tawar *add on* 650 MW, dan Peaker Grati 300 MW ternyata bus beban pada sistem masih ada yang mengalami under voltage.

Pada tabel 4.3 di bawah memperlihatkan rugi-rugi saluran running hasil load flow sistem transmisi 500 kV Jamali.

Tabel 4.3 Rugi-rugi daya saluran transmisi 500 kV sebelum pemasangan SVC

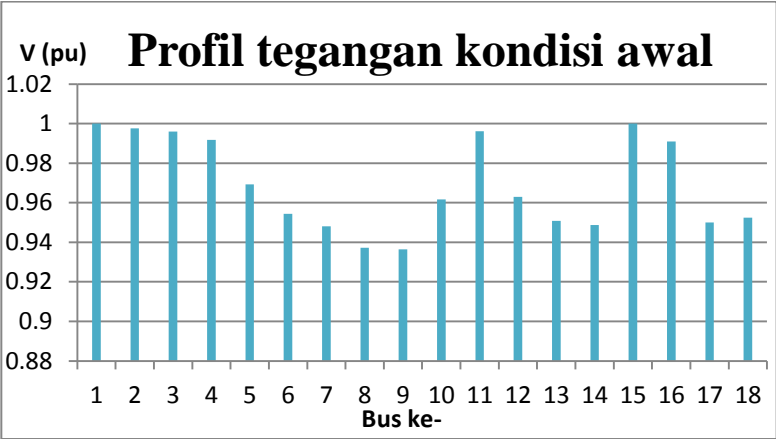
No. Saluran	Saluran		Rugi-rugi Daya Aktif (MW)	Rugi-rugi Daya reaktif (MVAR)
	Dari	Ke		
1	1	2	0.34	-22.25
2	1	5	9.69	-22.41
3	2	18	4.95	-70.83
4	3	5	5.4	4.33
5	4	27	16.32	-24.23
6	6	7	1.38	-22.23
7	6	5	4.55	-21.57
8	7	17	0.4	-9.78
9	7	8	2.48	-26.37
10	9	8	0.08	-10.7
11	10	16	38.94	-54.78
12	11	16	8.26	-188.99
13	11	22	0.32	-43.11
14	11	20	14.58	-23.13
15	11	19	2.81	-20.7
16	12	30	0.65	-83.13
17	12	14	1.6	-22.27
18	12	13	2.14	1.09
19	14	13	0.11	-14.17
20	15	24	2.85	-150.76
21	15	16	11.17	-145.93
22	16	19	6.26	-359.96
23	17	18	7.27	-180.46
24	17	18	0.17	-23.93
25	17	34	1.6	-124.26
26	18	36	0.46	-43.02
27	18	33	2.13	-125.68

Tabel 4.3 Rugi-rugi daya saluran transmisi 500 kV sebelum pemasangan SVC (lanjutan)

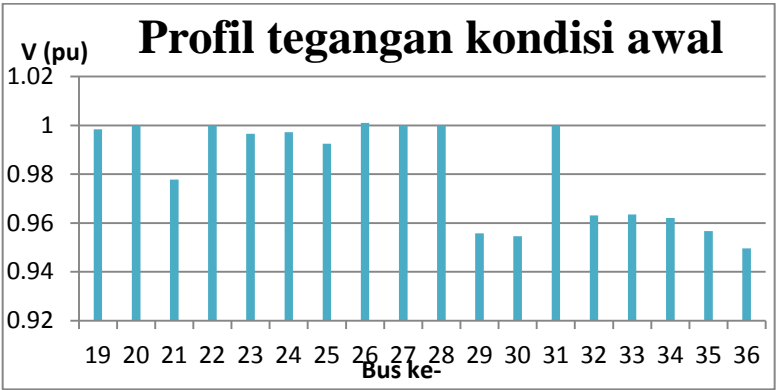
No. Saluran	Saluran		Rugi-rugi Daya Aktif (MW)	Rugi-rugi Daya reaktif (MVAR)
	Dari	Ke		
28	20	27	10.03	-65.83
29	21	23	17.15	-78.8
30	23	24	5.4	-277.13
31	24	25	10.05	-295.39
32	25	4	10.86	-98.04
33	26	28	0.27	-41.22
34	28	23	1.61	-44.62
35	29	32	1.77	-60.95
36	29	30	0.18	-20.37
37	31	3	0.51	-67.4
38	31	1	0	-1.1
39	33	34	1.75	-50.98
40	33	32	0.48	-42.58
41	34	10	2.86	-84.06
42	34	35	1.36	-40.35
43	34	21	6.6	-46.83
44	35	10	3.11	-84.82
45	36	13	0.01	-43.41
Total			220.91	-3273.11

Dari hasil simulasi aliran daya pada tabel 4.1 dan 4.2 dapat dilihat bahwa pada kondisi awal, yaitu masih dalam kondisi normal saat belum dilakukan perbaikan. Pada tabel tersebut bus yang memiliki tegangan abnormal yaitu bus yang memiliki tegangan dibawah 0,95 pu ($< 95\%$), sesuai standart yang diizinkan untuk tegangan transmisi 500 kV yaitu $\pm 5\%$. Dimana maupul dilakukan penambahan pembangkit 1575 MW, ada bus yang memiliki abnormal paling rendah adalah bus 9 dengan tegeangan 0.93636 pu. Sedangkan rugi-rugi daya aktif dan reaktif pada kondisi normal adalah 220.91 MW dan -3273.11 MVAR .

Grafik untuk kondisi tegangan bus sistem transmisi 500kV Jamali pada tahun 2017 dengan adanya penambahan pembangkit 1575 MW ditunjukkan pada gambar 4.1.



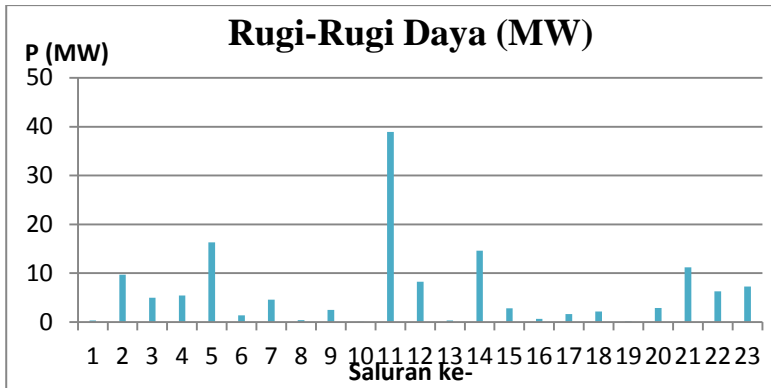
(a)



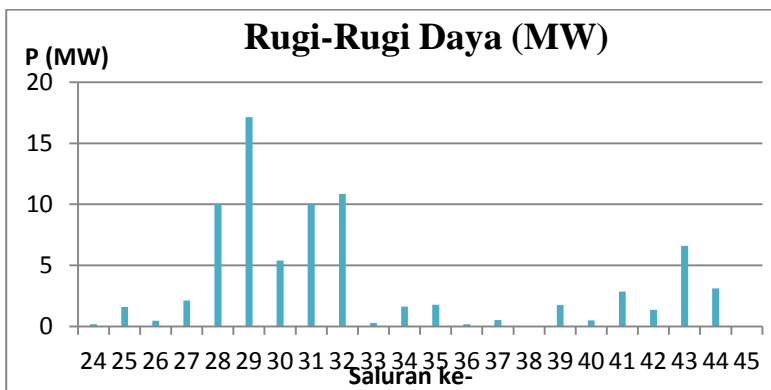
(b)

Gambar 4.1 Grafik profil tegangan bus sistem (a) bus no. 1-18, (b) bus no. 19-36

Adapun untuk grafik untuk rugi-rugi daya aktif (MW) sistem transmisi 500kV Jamali pada tahun 2017 ditunjukkan pada gambar 4.2.



(a)



(b)

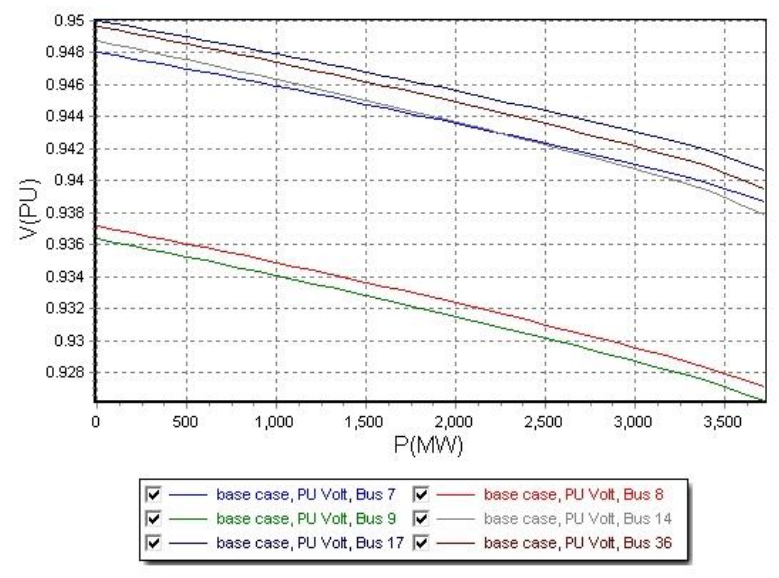
Gambar 4.2 Grafik rugi-rugi daya sistem (a) saluran no. 1-23, (b) saluran no. 24-45

4.5 Kurva PV

Kurva PV dapat diperoleh dengan melakukan penambahan beban secara kontinyu pada suatu bus hingga mencapai titik kritis dari bus tersebut. Karena karakteristik kurva PV untuk tegangan berbanding terbalik dengan perubahan beban, maka tegangan akan semakin turun akibat adanya penambahan beban. Dari hasil percobaan, nilai profil tegangan dari masing-masing bus dengan dibandingkan dengan tabel 4.1 serta dilihat pada tabel 4.2. yang kemudian nantinya dilihat pada kurva

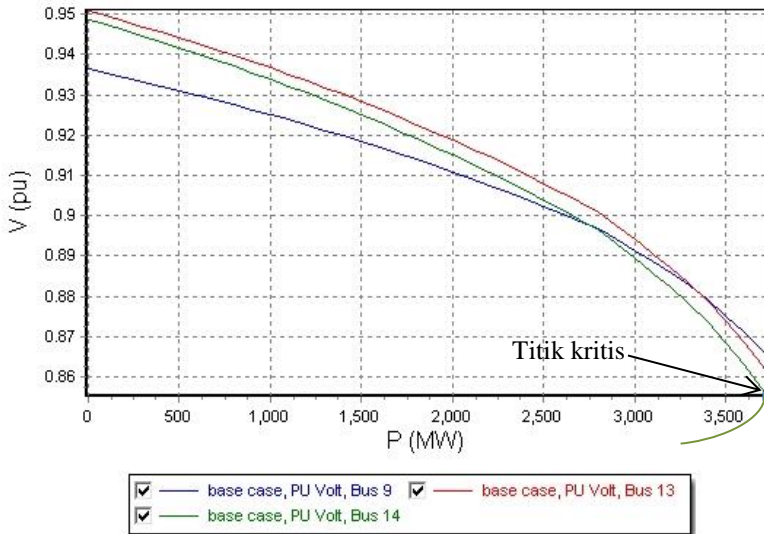
PV, untuk menyesuaikan bus mana yang paling sensitive mengalami drop tegangan paling tinggi jika dilakukan penambahan beban secara kontinyu.

Untuk bus yang mengalami *voltage collapse* yang akan dijadikan kandidat untuk diperbaiki sesuai hasil tabel 4.3 yang dibandingkan dengan tabel 4.4, diambil 6 bus yang mengalami *under voltage* yaitu 7, 8, 9, 14, 17 dan 36. Berikut hasil plot kurva PV, untuk bus yang sensitif, ditunjukkan pada gambar 4.3.



Gambar 4.3 Kurva PV bus sensitif

Pada gambar 4.3 penambahan beban dilakukan sampai mencapai titik kritis pada semua bus beban kecuali slack bus. Untuk melihat detail titik kritis pada plot kurva PV yang dihasilkan dari gambar 4.3, maka diambil 3 bus dari 6 bus yang paling sensitif mengalami drop tegangan yaitu bus 9, 13, dan 14. Ketika dilakukan penambahan beban kembali pada ketiga bus tersebut saat setelah mencapai titik kritis, maka operasi pada sistem menjadi tidak stabil yang ditunjukkan pada gambar 4.4



Gambar 4.4 Kurva PV bus sampai mencapai titik kritis

4.6 Sensitivitas Index

Berdasarkan gambar 4.3 terdapat beberapa bus yang mengalami drop tegangan yang melebihi standart, untuk urutan bus yang paling sensitif dengan melihat ΔV pada dibandingkan dengan ΔP pada semua bus beban pada sistem. Hal tersebut dapat dilihat pada sensitivitas tegangan urutan bus mana yang paling tinggi mengalami drop tegangan yang ditunjukkan pada tabel 4.4.

Pada percobaan ini dapat diketahui tingkat sensitivitas dari masing-masing bus. Dari gambar di atas diambil hasil untuk sembilan bus dengan nilai sensitifitas paling tinggi. Berdasarkan karakteristik kurva PV dapat diketahui bahwa dari dua belas bus yang memiliki sensitivitas paling tinggi ke paling rendah.

Untuk perbaikan tegangan dapat dilakukan dengan cara menambahkan SVC dan dipilih pada bus yang memiliki sensitivitas tinggi. Hal tersebut dapat dilakukan dengan membandingkan hasil sensitivitas tegangan dengan kurva PV, karena dari masing-masing bus dapat diketahui dengan melihat besar perubahan tegangan terhadap perubahan daya beban sistem. Setelah didapatkan kurva PV dari masing-masing bus maka ditentukan untuk pemasangan SVC.

Tabel 4.4 Tabel bus-bus sensitif sistem Jamali tahun 2017

No	No bus	Bus	VP Sensitivity
1	14	14_CAWANG	-0.00000322
2	13	13_BEKASI	-0.00000314
3	9	9_DURIKOSAMBI	-0.00000306
4	12	12_M.TAWAR	-0.00000306
5	8	8_KEMBANGAN	-0.00000305
6	36	36_TAMBUN	-0.00000304
7	30	30_CIBATU	-0.00000299
8	29	29_DELTAMAS	-0.00000292
9	7	7_GANDUL	-0.00000284
10	18	18_CIBINONG	-0.00000283
11	17	17_DEPOK	-0.00000281
12	6	6_LENGKONG	-0.00000261

4.7 Pemasangan SVC

Penempatan SVC diimplementasikan berdasarkan hasil dari karakteristik kurva PV dari bus sensitif. Pemasangan SVC digunakan Untuk perbaikan tegangan pada bus yang mengalami under voltage dengan menambah Q (daya reaktif). Berdasarkan hasil percobaan yang ditunjukkan pada tabel 4.4 dan kurva pada gambar 4.3, Maka pemilihan bus yang akan dipasang SVC dipilih dari 2 bus paling sensitif yaitu pada bus 14 dan 9.

Ukuran SVC yang dipasang pada masing-masing bus diasumsikan dari 0-300 Mvar. Setelah simulasi dijalankan, maka dipilih injeksi yang paling maksimum, agar pada saat kondisi beban kritis tegangan pada bus sistem transmisi 500 kV masih berada pada keadaan standart 0.95-1.05 pu. Besar daya reaktif yang diinjeksikan adalah:

- Bus 14 = 296.6 Mvar
- Bus 9 = 287.4 Mvar

4.8 Analisis Stabilitas Tegangan Setelah Penambahan SVC

Adanya pemasangan SVC, beban akan mendapat suplai daya reaktif sehingga SVC sebagai kompensasi yang digunakan untuk mengurangi penyerapan daya reaktif sistem oleh beban, karena jatuh

tegangan pada sisi penerima salah satunya merupakan akibat adanya beban yang bersifat induktif.

Hasil running program load flow untuk tegangan pada saat kondisi normal ketika sebelum pemasangan SVC dan setelah pemasangan SVC. dapat dilihat pada tabel 4.5 dan grafik profil tegangan ditunjukkan pada gambar 4.5.

Tabel 4.5 Hasil profil tegangan pada sisten Jamali tahun 2017

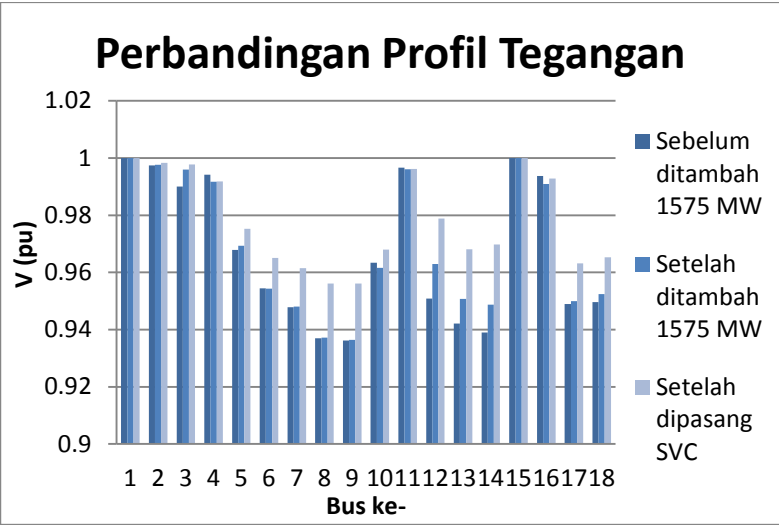
Bus No.	Sebelum Pemasangan SVC		Setelah Pemasangan SVC	
	V (pu)	V (kV)	V (pu)	V (kV)
1	1	500	1	500
2	0.99764	498.819	0.99825	498.905
3	0.9959	497.951	0.99775	498.074
4	0.99173	495.866	0.99184	492.904
5	0.96932	484.662	0.9752	485.57
6	0.95432	477.16	0.96511	480.024
7	0.94801	474.004	0.9615	478.179
8	0.93717	468.587	0.95605	475.111
9	0.93636	468.179	0.95609	475.107
10	0.96161	480.807	0.96796	482.364
11	0.99609	498.046	0.99622	498.111
12	0.96291	481.453	0.97884	489.422
13	0.95077	475.383	0.96805	484.024
14	0.9487	474.352	0.96978	484.891
15	1	500	1	500
16	0.99091	495.454	0.99286	496.43
17	0.94998	474.989	0.96314	481.57
18	0.95239	476.193	0.96533	482.666
19	0.99838	499.188	0.99886	499.428
20	1	500	1	500
21	0.97776	488.879	0.98255	491.274

Tabel 4.5 Hasil profil tegangan pada sisten jamali tahun 2017 (lanjutan)

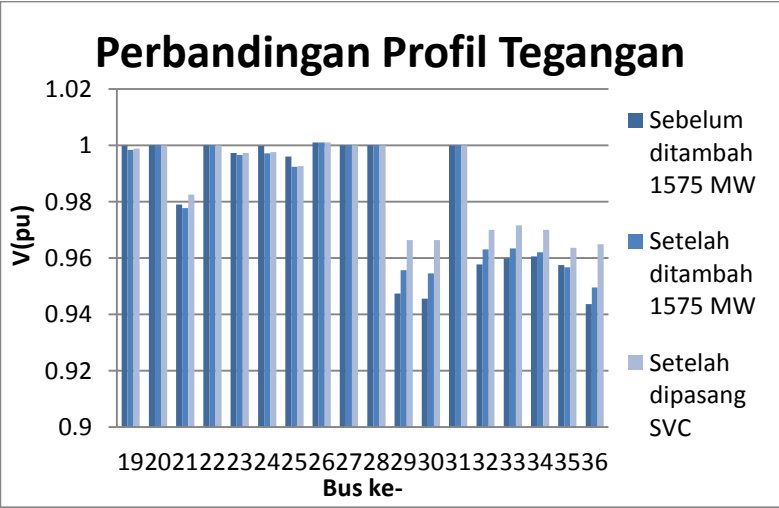
Bus No.	Sebelum Pemasangan SVC		Setelah Pemasangan SVC	
	V (pu)	V (kV)	V (pu)	V (kV)
22	1	500	1	500
23	0.99658	498.289	0.99725	498.625
24	0.99722	498.61	0.99762	498.808
25	0.99241	496.207	0.99264	496.318
26	1.001	500.5	1.001	500.5
27	1	500	1	500
28	1	500	1	500
29	0.95573	477.863	0.96644	483.221
30	0.95463	477.315	0.96643	483.213
31	1	500	1	500
32	0.96313	481.565	0.97	485
33	0.96347	481.734	0.97165	485.826
34	0.96207	481.034	0.96998	484.992
35	0.9567	478.348	0.96366	481.83
36	0.94963	474.815	0.96488	482.438

Dari hasil percobaan dapat diketahui menunjukkan bahwa aliran daya pada keadaan normal setelah pemasangan SVC dapat memperbaiki jatuh tegangan pada bus yang sebelumnya mengalami *under voltage*, seperti pada bus 9 yang merupakan bus terendah, saat sebelum dipasang SVC tegangan pada bus 9 yaitu 0.93636 pu dan setelah dipasang SVC menjadi 0.95609. Pemasangan SVC dilakukan pada dua tempat yang memiliki bus dengan sensitifitas tertinggi yaitu pada bus Cawang dan Durikosambi, karena kedua bus jika dilihat pada gambar 4.3 dan tabel 4.4 merupakan bus yang paling sensitif mengalami drop tegangan saat terjadi penambahan beban.

Setelah diinjeksikan daya reaktif dari SVC dapat dilihat hasil plot kurva PV setelah perbaikan dari bus *under voltage* yang ditunjukkan gambar 4.6.

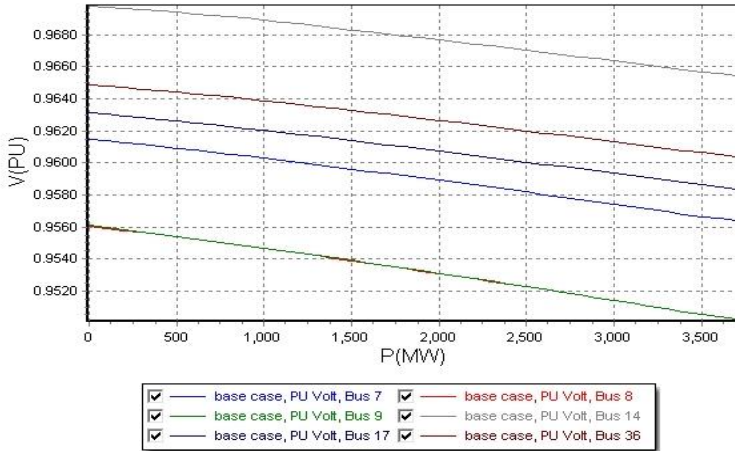


(a)



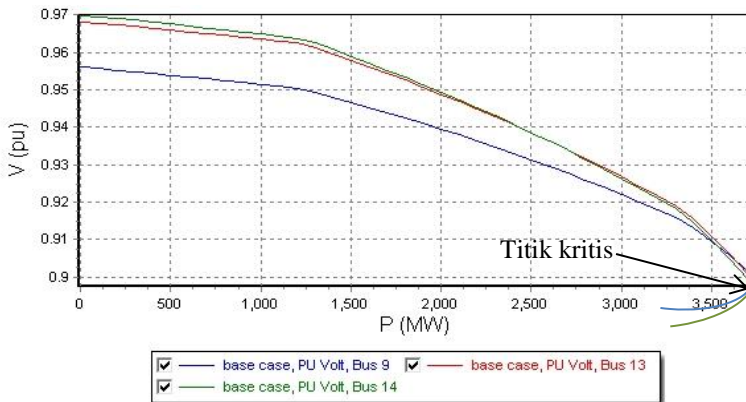
(b)

Gambar 4.5 Grafik profil tegangan bus sistem sebelum dan setelah perbaikan (a) bus no. 1-18, (b) bus no. 19-36



Gambar 4.6 Kurva PV bus 7, 8, 9, 14, 17 dan 36 setelah perbaikan

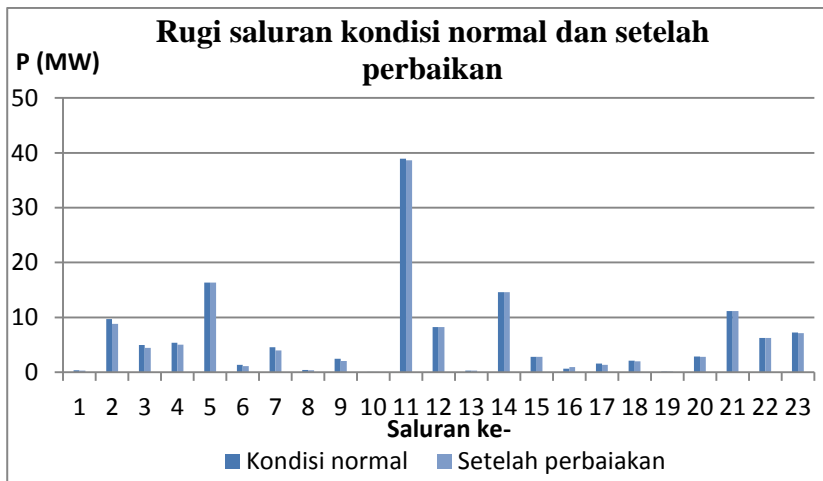
Pada gambar 4.6 penambahan beban setelah dipasang svc dilakukan sampai mencapai beban maksimum dengan batas tegangan yang masih diijinkan pada semua bus beban kecuali slack bus. Untuk melihat detail titik kritis pada plot kurva PV yang dihasilkan dari gambar 4.6, maka diambil 3 bus dari 6 bus yang paling sensitif mengalami drop tegangan yaitu bus 9, 13, dan 14.,maka operasi pada sistem menjadi tidak stabil yang ditunjukkan pada gambar 4.7



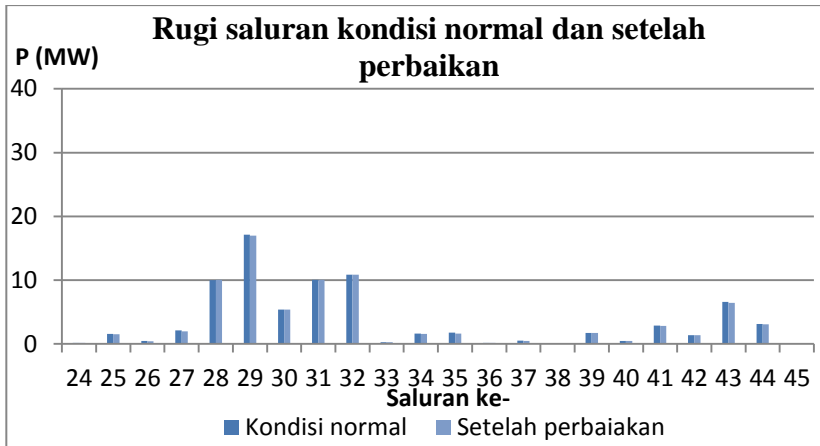
Gambar 4.7 Kurva PV bus 9, 13, dan 14 setelah perbaikan

Dari gambar 4.6 dan 4.7, untuk mengetahui kestabilan tegangannya, beban dinaikkan secara berkala dari kondisi normal dimana beban hingga mencapai batas maksimum penambahan beban pada tiap-tiap bus beban atau kondisi kritis yaitu sebesar perubahan beban totalnya 3724.354 MW. Dengan pemasangan SVC menunjukkan adanya perubahan tegangan yang hasilnya dapat dilihat pada grafik kurva PV, dimana tegangan pada bus meningkat dan berada pada batas kestabilan tegangan. Sehingga dapat dilihat setelah dilakukan pemasangan SVC titik kritis dari masing-masing bus meningkat. Dimana nilai tegangan masing-masing bus dapat dilihat dari grafik diatas.

Selain perbaikan profil tegangan dan plot kurva PV, pemasangan SVC juga dapat mengurangi rugi-rugi daya pada saluran, karena pada hakikatnya rugi-rugi saluran juga penyebab terjadinya drop tegangan pada bus. Rugi-rugi saluran tidak dapat dihilangkan hanya saja dapat diminamilisir, Dimana rugi-rugi awal yang semula bernilai 220.91 MW berkurang menjadi 216.45 MW. Artinya rugi-rugi daya aktif yang pada saluran dapat berkurang sebesar 2.02 % setelah adanya pemasangan SVC. Perbandingan rugi-rugi daya pada saluran transmisi 500 kV tahun 2017 dari hasil simulasi load flow sebelum dan sesudah pemasangan SVC ditunjukkan pada gambar 4.8.



(a)



(b)

Gambar 4.8 Grafik rugi-rugi saluran sebelum dan setelah perbaikan (a) bus no. 1-23, (b) bus no. 24-45

BAB 5

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil yang didapatkan dari simulasi dan analisis pada tugas akhir ini, dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut..

1. Pada sistem transmisi jamali tahun 2017 dengan penambahan pembangkit 1575 MW saat dilakukan studi aliran daya dengan metode newton raphson, didapatkan 6 bus dari 36 bus yang mengalami *under voltage*.
2. Untuk menganalisa terjadinya drop tegangan akibat penambahan beban maka digunakan Kurva PV untuk menentukan tingkat stabilitas dari masing-masing bus, sehingga dapat dilihat sensitivitas dari masing-masing bus.
3. Penentuan lokasi untuk pemasangan SVC diambil dari hasil metode sensitivitas tegangan, dimana diambil 2 bus teratas yang paling sensitif.
4. Perbaikan tegangan dengan pemasangan SVC pada bus sensitif memberikan hasil tegangan sistem yang stabil.
5. Profil tegangan dapat diperbaiki dengan pemasangan SVC sehingga berada pada batas toleransi, adapun profil tegangan terendah sebelum pemasangan SVC berada pada bus 9 yaitu 0.93636 pu, setelah perbaikan profil tegangan menjadi 0.95609 pu.

5.2 Saran

Saran yang dapat diberikan untuk perbaikan dan pengembangan simulasi ini adalah sebagai berikut :

1. Untuk penentuan kapasitas SVC, ada beberapa metode yang mungkin bisa lebih optimal untuk injek MVAR pada bus yang mengalami drop tegangan.
2. Perlu sebuah pengembangan untuk menentukan kestabilan sistem berdasar faktor-faktor lain misalnya faktor kontingensi, pertumbuhan beban di masa mendatang, dan lain-lain.

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. Manisha Rani, Anju Gupta, *Steady State Voltage Stability Enhancement of Power System Using FACTS Device*. IEEE, 2014.
- [2]. N. G. Hingorani and L. Gyugyi, "Understanding FACTS-concepts and technology of flexible AC transmission systems," IEEE press, First Indian Edition, 2001.
- [3]. Khandani, S. Soleymani, b. mozafari, "Optimal Placement of SVC To Improve Voltage Profile Using Hybrid Genetics Algorithm And Sequential Quadratic Programming", conference on electrical power distribution network (EPDC), 2011.
- [4]. Anju Gupta, P.R. Sharma, "Optimal Placement of FACTS Devices for Voltage Stability Using Line Indicator", IEEE, 2012.
- [5]. M. Karami, N. Mariun, "Determining optimal location of Static Var Compensator by means of genetic algorithm" IEEE, 2011.
- [6]. IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions, "*Definition and Classification of Power System Stability*" IEEE Transactions on Power system , vol. 19, no. 2, may 2004.
- [7]. Kundur, P, *Power System Stability and Control*. New York: McGraw-Hill, Inc, 1994.
- [8]. Bhole. SS, Nigam. P, "Improvement of Voltage Stability in Power System by Using SVC and STATCOM", IJAREEIE, Vol.4, Issue 2, February 2015.
- [9]. Kolluri. V.S, Mandal. S, Claus. M, "Application of Static Var Compensator in Energy System to address Voltage Stability Issues – Planning and Design Considerations", IEEE, 2006.
- [10]. Penangsang, Ontoseno. "*Diktat Kuliah Analisis Sistem Tenaga Listrik 2*", Jurusan Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.
- [11]. Suprijanto, Adi. "*Analisis Sistem Tenaga Listrik I* ", Jurusan Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.
- [12]. Saadat, H., "Power System Analysis", McGraw-Hill, Inc, 1999.

- [13]. Haskar, M. Subramani, C. Jagdeesh Kumar, M. Dash, S.S., "*Voltage Profile Improvement Using FACTS Devices: A Comparison between SVC, TCSC and TCPST*" International Conference on Advances in Recent Technologies in Communication and Computing, 2009, page(s): 890 - 892, 17 November 2009.
- [14]. Stevenson, W.D., Jr and John J. Grenger, "*Elements of Power System Analysis, 4th Edition*". McGraw-Hill, Inc, 1994.
- [15]. Karbalaei. F, Abasi. S, "Prediction of Voltage Collapse in Presence of Voltage Dependent Loads by PV Curve Approximation", IEEE, 2011.
- [16]. Agung Sembogo. T, "Studi Perbaikan Stabilitas Tegangan Kurva P-V pada Sistem Jawa-Bali 500kV dengan Pemasangan Kapasitor Bank Menggunakan Teori Sensitivitas", Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 2012.
- [17]. Galih Indarko. F, "Penentuan MVar Optimal SVC pada Sistem Transmisi Jawa Bali 500 kV Menggunakan Artificial Bee Colony Algorithm", Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 2011.
- [18]. Hastanto, Ari, "Optimasi Penempatan SVC untuk Memperbaiki Profil Tegangan pada Sistem 500 kV Jamali menggunakan metode PSO ", Teknik Elektro, Universitas Diponegoro, Semarang, 2012.
- [19]. Pujo Puryono. H, " Studi Perbaikan Stabilitas Tegangan Sistem Jawa-Madura-Bali (Jamali) dengan Pemasangan SVC Setelah Masuknya Pembangkit 1000 MW Paiton", Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 2016.

RIWAYAT HIDUP



Radhito Dewanata Putra, dilahirkan di kota Banyuwangi, 07 September 1994. Penulis memulai pendidikannya dari TK Khodijah 157 pada tahun 1999 – 2000. Kemudian melanjutkan ke SDN I Rogojampi pada tahun 2000 - 2006. Setelah itu ia melanjutkan pendidikannya ke SMP Negeri 1 Rogojampi pada tahun 2006 - 2009, setelah lulus ia diterima sebagai murid SMA Negeri 1 Glagah pada tahun 2009 - 2012. Pada tahun yang sama ia masuk ke Jurusan D3 Teknik Elektro Industri - Politeknik Elektronika Negeri Surabaya hingga lulus tahun 2015. Penulis kemudian melanjutkan studi Program Sarjana di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya jurusan Teknik Elektro dan mengambil bidang studi Teknik Sistem Tenaga.
email : dewanata07091994@gmail.com

Halaman ini sengaja dikosongkan

LAMPIRAN

TABEL PERUBAHAN KAPASITAS NILAI SVC TERHADAP PERUBAHAN TEGANGAN

No Bus.	Kondisi Normal	Kondisi Penambahan Beban	Switching Bsh SVC (pu)													
			0,6	0,8	1	1,2	1,4	1,6	1,8	2	2,2	2,4	2,6	2,8	3	
			PU Volt	PU Volt	PU Volt	PU Volt	PU Volt	PU Volt	PU Volt	PU Volt	PU Volt	PU Volt	PU Volt	PU Volt	PU Volt	PU Volt
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
2	0.99764	0.99697	0.99717	0.99724	0.99731	0.99738	0.99745	0.99752	0.99759	0.99766	0.99769	0.99772	0.99775	0.99778	0.99781	
3	0.9959	0.99372	0.99428	0.99447	0.99466	0.99486	0.99505	0.99525	0.99545	0.99565	0.99575	0.99585	0.99595	0.99605	0.99615	
4	0.99173	0.9856	0.98566	0.98568	0.98569	0.98571	0.98573	0.98575	0.98577	0.98579	0.98579	0.9858	0.9858	0.9858	0.98581	
5	0.96932	0.96343	0.9652	0.96581	0.96642	0.96704	0.96766	0.9683	0.96894	0.96957	0.96988	0.97019	0.9705	0.97082	0.97114	
6	0.95432	0.94591	0.94916	0.95027	0.95139	0.95253	0.95367	0.95483	0.95601	0.95717	0.95773	0.9583	0.95888	0.95946	0.96005	
7	0.94801	0.93869	0.94275	0.94414	0.94554	0.94696	0.94839	0.94984	0.95131	0.95275	0.95346	0.95417	0.9549	0.95562	0.95636	
8	0.93717	0.92712	0.93221	0.93395	0.93571	0.93748	0.93928	0.94109	0.94293	0.94475	0.94583	0.94691	0.948	0.94911	0.95022	
9	0.93636	0.92626	0.93151	0.93331	0.93512	0.93695	0.9388	0.94067	0.94257	0.94445	0.94558	0.94672	0.94787	0.94904	0.95021	
10	0.96161	0.95343	0.95644	0.95748	0.95852	0.95957	0.96063	0.96171	0.9628	0.96386	0.96403	0.9642	0.96437	0.96455	0.96473	
11	0.99609	0.99343	0.9937	0.99379	0.99388	0.99397	0.99407	0.99416	0.99426	0.99435	0.99437	0.99438	0.9944	0.99442	0.99443	
12	0.96291	0.95266	0.9581	0.95996	0.96183	0.96373	0.96565	0.96759	0.96955	0.97148	0.97223	0.97298	0.97374	0.97451	0.97528	
13	0.95077	0.94027	0.94575	0.94762	0.94951	0.95142	0.95336	0.95532	0.9573	0.95925	0.96012	0.961	0.96189	0.96278	0.96369	
14	0.9487	0.9379	0.94418	0.94633	0.94849	0.95069	0.9529	0.95515	0.95742	0.95966	0.96079	0.96192	0.96307	0.96423	0.96539	
15	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
16	0.99091	0.9858	0.98678	0.98712	0.98745	0.98779	0.98814	0.98849	0.98884	0.98919	0.98924	0.9893	0.98936	0.98942	0.98947	
17	0.94998	0.94068	0.94479	0.9462	0.94761	0.94904	0.95049	0.95196	0.95344	0.9549	0.95557	0.95624	0.95693	0.95761	0.95831	
18	0.95239	0.94301	0.94726	0.94871	0.95017	0.95165	0.95315	0.95467	0.9562	0.95771	0.95834	0.95897	0.95961	0.96026	0.96091	
19	0.99838	0.99432	0.99472	0.99487	0.99501	0.99515	0.99529	0.99544	0.99558	0.99573	0.99575	0.99577	0.9958	0.99582	0.99585	
20	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
21	0.97776	0.97354	0.97547	0.97614	0.9768	0.97748	0.97816	0.97885	0.97954	0.98023	0.9804	0.98058	0.98076	0.98095	0.98113	
22	1	0.99804	0.9983	0.99839	0.99848	0.99858	0.99867	0.99876	0.99886	0.99895	0.99897	0.99898	0.999	0.99902	0.99903	
23	0.99658	0.99541	0.99568	0.99578	0.99587	0.99597	0.99606	0.99616	0.99626	0.99636	0.99638	0.99641	0.99643	0.99646	0.99648	
24	0.99722	0.99222	0.99239	0.99245	0.99251	0.99257	0.99263	0.99269	0.99275	0.99281	0.99282	0.99284	0.99285	0.99287	0.99288	
25	0.99241	0.98441	0.98451	0.98455	0.98458	0.98462	0.98465	0.98469	0.98473	0.98476	0.98477	0.98478	0.98479	0.98479	0.9848	
26	1.001	1.001	1.001	1.001	1.001	1.001	1.001	1.001	1.001	1.001	1.001	1.001	1.001	1.001	1.001	
27	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
28	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
29	0.95573	0.94588	0.95078	0.95247	0.95416	0.95587	0.9576	0.95935	0.96112	0.96284	0.96315	0.96347	0.96378	0.9641	0.96442	
30	0.95463	0.94454	0.94957	0.95129	0.95302	0.95477	0.95655	0.95834	0.96016	0.96193	0.96233	0.96273	0.96314	0.96355	0.96396	
31	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
32	0.96313	0.95467	0.9591	0.96062	0.96215	0.9637	0.96527	0.96685	0.96845	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	

TABEL PERUBAHAN KAPASITAS NILAI SVC TERHADAP PERUBAHAN TEGANGAN

No Bus.	Kondisi Normal	Kondisi Penambahan Beban	Switching Bsh SVC (pu)												
			0,6	0,8	1	1,2	1,4	1,6	1,8	2	2,2	2,4	2,6	2,8	3
	PU Volt	PU Volt	PU Volt	PU Volt	PU Volt	PU Volt	PU Volt	PU Volt	PU Volt	PU Volt	PU Volt	PU Volt	PU Volt	PU Volt	PU Volt
33	0.96347	0.95534	0.95951	0.96094	0.96237	0.96383	0.9653	0.96678	0.96829	0.96975	0.96992	0.97009	0.97027	0.97044	0.97062
34	0.96207	0.95423	0.95796	0.95925	0.96053	0.96183	0.96315	0.96449	0.96583	0.96715	0.96736	0.96757	0.96779	0.968	0.96822
35	0.9567	0.94832	0.95162	0.95276	0.95389	0.95504	0.95621	0.95738	0.95857	0.95973	0.95992	0.96011	0.9603	0.96049	0.96069
36	0.94963	0.93951	0.94442	0.9461	0.94779	0.9495	0.95123	0.95298	0.95475	0.95649	0.95725	0.95801	0.95878	0.95956	0.96035
Σ under volt bus	6	12	10	8	7	5	3	3	2	2	2	2	2	2	0

No.	Nomor Bus	Nama Bus	Perubahan Nilai Q SVC (MVAR)												
			Actual Mvar	Actual Mvar	Actual Mvar	Actual Mvar	Actual Mvar	Actual Mvar	Actual Mvar	Actual Mvar	Actual Mvar	Actual Mvar	Actual Mvar	Actual Mvar	Actual Mvar
1	14	CAWANG	54.1	72.8	91.8	111.1	130.7	150.7	171	191.6	212.1	232.8	253.9	275.1	296.6
2	9	DURIKO SAMBI	52.7	70.8	89.2	107.9	126.9	146.1	165.7	185.6	205.5	225.6	45.9	266.5	287.4

Ket: Ybase = 0,0004 Ů; Vbase = 500 kV; MVAbase = 100 MVA